

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

**“DISEÑO DE AISLADORES SÍSMICOS LRB Y ANALISIS POR DESEMPEÑO
DE EDIFICIOS”**

AUTORES:

CHRISTIAN ADRIÁN TAPIA DELGADO

CI: 0105203194

LUIS DAVID VELETANGA MENA

CI: 0104503495

DIRECTOR:

Ing. FRANCISCO FLORES SOLANO, Ph.D.,

CI: 0301547410

Trabajo de titulación previa a la obtención del título de Ingeniero Civil.

CUENCA-ECUADOR

ABRIL 2017



Resumen:

El propósito de este estudio es presentar una guía de diseño y modelación de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo para mitigar el daño producido por movimientos sísmicos en estructuras diseñadas de manera tradicional. La idea fue implementar un sistema que aisle al edificio del peligro sísmico al desacoplarla del suelo. El principio del sistema es de el de disipar la energía de ingreso de un evento telúrico proveyendo un mejor comportamiento de la estructura comparado a las diseñadas tradicionalmente. El criterio de diseño está basado en la formulación del análisis estático, y los procedimientos de diseño usando un programa computacional de elementos finitos como Etabs 2015. El edificio con el sistema de aislamiento implementado será sometido a un registro sísmico correspondiente al último terremoto ocurrido en Ecuador el 16 de abril de 2016 en la dirección más perjudicial por motivos de evaluación. Se muestra que el aislamiento sísmico contribuye a un mejor comportamiento de estructuras diseñadas de manera tradicional en criterios de disipación de energía que ocurre esencialmente en el sistema de aislación, reducción de la deriva de piso y daño en general.

Palabras Clave: Aislamiento basal, aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, sistema de aislación, deriva de piso, disipación de energía.



Abstract:

The purpose of this study is to set up a design and modelling guide for lead rubber bearing seismic isolators to mitigate damage produced by seismic motion to traditionally designed structures. The idea was to introduce a system that isolates the building from seismic hazard by decoupling it from the ground. This system is to dissipate energy incoming from seismic motion providing a better behavior of the structure compare to those traditionally designed. The design criteria is based on formulation of static analysis, and modelling procedures by using finite element software such as Etabs 2015. The building with the implemented isolation system will be submitted to ground motion corresponding to the latest earthquake occurred in Ecuador on April 16th, 2016 on the worst direction for evaluation purposes. It is shown that seismic isolation contributes to a better behavior of traditionally designed structures in matters of energy dissipation occurring essentially at the isolation system, interstory drift reduction, and damage overall.

Keywords: Base isolation, lead rubber bearing seismic isolators, isolation system, interstory drift, energy dissipation.



Tabla de contenido:

1.	Introducción	19
1.1.	Antecedentes y Justificación.....	19
1.2.	Objetivos	20
1.2.1.	Objetivo General.....	20
1.2.2.	Objetivos Específicos	20
1.3.	Organización del trabajo de titulación	21
2.	Aislamiento basal	22
2.1.	Historia y concepto	22
2.2.	Fundamentos.....	23
2.3.	Tipos de Aislación Sísmica Basal	25
2.3.1.	Sistemas de Aislamiento Basal Pasivo	25
2.3.2.	Sistemas de aislamiento híbrido con dispositivos semi-activos:.....	27
2.3.3.	Aislador de base híbrido con disipadores de energía pasivos.....	27
2.4.	Factibilidad	28
2.5.	Ejemplos de estructuras aisladas:	28
3.	Diseño de aisladores LRB.....	36
3.1.	Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)	36
3.2.	Variabilidad de las propiedades mecánicas:	39
3.3.	Características mecánicas de los aisladores:	40
3.4.	Modelamiento	43
3.4.1.	Implicaciones del modelo bilineal.....	44
3.5.	Proceso general de diseño del aislador	46
3.6.	Verificación de funcionalidad y seguridad de los aisladores.....	51
3.6.1.	Fuerza restauradora	52
3.6.2.	Vuelco	53
3.6.3.	Esfuerzos de corte.....	58
3.6.3.1.	Cargas de servicio	60



3.6.3.2.	Sismo de diseño	61
3.6.3.3.	Sismo máximo probable.....	62
3.6.4.	Esfuerzo de tensión	63
3.6.5.	Otras normas.....	64
3.7.	Proceso de diseño del sistema de aislación LRB:.....	65
3.7.1.	Dimensionamiento del sistema de aislación.	65
3.7.1.1.	Sistemas de aislación con aisladores de tipo LRB y NRB	69
3.7.2.	Evaluación del comportamiento de la estructura bajo el sismo máximo probable con el sistema de aislamiento dimensionado	70
3.7.3.	Verificaciones	72
3.7.3.1.	Fuerza restauradora	72
3.7.3.2.	Vuelco	72
3.7.3.3.	Esfuerzos de corte	74
4.	Diseño tradicional.....	81
4.1.	Geometría y ubicación de la edificación.....	81
4.2.	Espectro de diseño	82
4.3.	Cargas y combinaciones de cargas	83
4.4.	Método de diseño	84
4.4.1.	Configuración estructural.....	84
4.4.2.	Cortante basal	85
4.5.	Periodos de vibración	86
4.6.	Derivas de piso	87
4.7.	Diseño de los elementos estructurales	90
5.	Diseño y modelamiento del sistema de aislación	100
5.1.	Especificaciones estructurales.....	100
5.2.	Diseño del sistema de aislación.....	102
5.3.	Modelamiento de aisladores y del sistema de aislación (1 Grado de libertad)	
	106	



5.3.1.	Modelamiento de aisladores	106
5.3.1.1.	Modelamiento de aislador NRB	106
5.3.1.2.	Modelamiento de aislador LRB.....	108
5.3.1.3.	Modelamiento del sistema de aislación	109
5.4.	Verificación de desplazamiento del sistema de aislación	114
5.5.	Modelamiento del sistema de aislación y super-estructura (Múltiples grados de libertad) 117	
5.6.	Verificaciones	118
5.6.1.	Fuerza restauradora	119
5.6.2.	Vuelco	119
5.6.3.	Esfuerzos de corte.....	120
5.6.4.	Valores límites	120
5.6.4.1.	Carga de servicio	120
6.	Análisis por desempeño y resultados	127
6.1.	Análisis lineal.....	132
6.1.1.	Análisis modal espectral	133
6.1.2.	Análisis tiempo historia	137
6.2.	Análisis no lineal.....	140
6.2.1.	Análisis tiempo historia (DBE)	140
6.2.2.	Análisis tiempo historia (MCE):.....	142
7.	Conclusiones y recomendaciones	144
8.	Bibliografía	146



Índice de figuras:

Figura 2.1.- Incremento del Periodo en Estructuras Aisladas IBC 2012 (Council. 2011)	23
Figura 2.2.- Efecto del incremento de desplazamiento en el desplazamiento espectral. (Christopoulos, Filiatrault, and Bertero 2006).	24
Figura 2.3.- Comparación de estructura tradicional con estructura aislada bajo efectos sísmicos. (T. E. Kelly et al. 2010).	25
Figura 2.4.- Hospital Universitario de California del Sur “Datos del mapa ©2017 Google”	29
Figura 2.5.-Fábrica de manufactura de Evans y Sutherland “Datos del mapa ©2017 Google”	29
Figura 2.6.-Edificio de la Ciudad de Lago Salado “Datos del mapa ©2017 Google”	30
Figura 2.7.-Edificio Bridgestone Toranomon “Datos del mapa ©2017 Google”	31
Figura 2.8.-Palacio Municipal de San Francisco “Datos del mapa ©2017 Google”	31
Figura 2.9.-Hospital V.A. Long Beach “Datos del mapa ©2017 Google”	32
Figura 2.10.-Nuevo Hospital de Cuidados Médicos Mills-Península “Datos del mapa ©2017 Google”	32
Figura 2.11.-Cathedral of Christ the Light “Datos del mapa ©2017 Google”	33
Figura 2.12.-El Centro de operaciones de emergencia en el condado de Los Ángeles “Datos del mapa ©2017 Google”	34
Figura 2.13.-M. L. King/C. R. Drew Diagnostics Trauma Center “Datos del mapa ©2017 Google”	34
Figura 1.14.- Aislador elastomérico con núcleo de plomo. (W. H. Robinson and Tucker 1976).	37
Figura 2.15.- Módulo de compresión para elastómeros con núcleo de plomo. (Naeim and Kelly 1999).	42
Figura 2.16.- Distribución de presión parabólica para una capa de elastómero. (T. E. Kelly et al. 2010).	43
Figura 3.1.- Curva de histéresis del aislador LRB. (T. E. Kelly et al. 2010).	44



Figura 3.2.- Características del modelo bilineal del aislador LRB. (Naeim and Kelly 1999).	44
Figura 3.3.- Desplazamiento estimado de espectros de desplazamiento para sismo máximo. (Council. 2011).	47
Figura 3.4.- (T. E. Kelly et al. 2010) Efecto del confinamiento del núcleo de plomo. ...	51
Figura 3.5.- Unidad de aislamiento en funcionamiento. (Naeim and Kelly 1999).	54
Figura 3.6.- Área de concentración de compresión bajo deformaciones horizontales. (Naeim and Kelly 1999).	57
Figura 3.7.- Localidad de los esfuerzos máximos de corte en una sola capa de goma. (Michael C. Constantinou et al. 2011).	59
Figura 3.4.- Esfuerzos en las placas de refuerzo. (Michael C. Constantinou et al. 2011).	60
Figura 4.1.- Modelo tridimensional "Etabs 2015"	81
Figura 4.2.- Ejes principales "Etabs 2015".	82
Figura 4.3.- Espectro de Diseño	83
Figura 4.4.- Configuración de elevación "Etabs 2015"	84
Figura 4.5 Diagrama de Interacción para columna de pisos 1-3.	98
Figura 4.6 Diagrama de Interacción para columna de pisos 4-5.	98
Figura 5.1.- Configuración en planta "Etabs 2015"	100
Figura 5.2.- Configuración de elevación "Etabs 2015"	101
Figura 5.3.- Espectro de diseño (NEC y ASCE).	102
Figura 5.4.- Opciones generales del modelamiento de aislador NRB "Etabs 2015". .	107
Figura 5.5.- Modelamiento de características principales de aislador NRB "Etabs 2015".	107
Figura 5.6.- Opciones generales del modelamiento de aislador NRB "Etabs 2015". .	108
Figura 5.7.- Modelamiento de características principales de aislador LRB "Etabs 2015".	109
Figura 5.8.- Opciones generales del modelamiento del sistema de aislación "Etabs 2015".	110



Figura 5.9.- Modelamiento de características principales del sistema de aislación “Etabs 2015”.	110
Figura 5.10.- Gráfica desplazamiento vs fuerza en campo lineal.	112
Figura 5.11.- Curva histerética teórica vs curva histerética obtenida de análisis Pushover.	113
Figura 5.12.-Acelerograma utilizado para análisis de vibración libre “Etabs 2015”....	114
Figura 5.13.- Espectro de diseño considerando el amortiguamiento provisto del sistema en el rango de periodo elongado “Etabs 2015”.	115
Figura 5.14.-Distribución de aisladores “Etabs 2015”	118
Figura 6.1 Daño y niveles de desempeño estructural para estructuras de concreto..	128
Figura 6.1 Espectro del acelerograma escalado para la estructura empotrada.....	132
Figura 6.2 Espectro del acelerograma escalado para la estructura aislada.....	132
Figura 6.3 Comparación de desplazamiento de las estructuras.	133
Figura 6.4 Comparación de desplazamiento de las estructuras respecto a la base. .	134
Figura 6.5 Comparación de derivas de las estructuras.	135
Figura 6.6 Comparación de cortante de piso de las estructuras.....	135
Figura 6.7 Demanda máxima en elementos estructurales tipo columna (pisos 1-3)..	136
Figura 6.8 Demanda máxima en elementos estructurales tipo columna (pisos 4-5)..	137
Figura 6.9 Comparación de desplazamiento de las estructuras.	138
Figura 6.10 Comparación de desplazamiento de las estructuras respecto a la base.	138
Figura 6.11 Comparación de derivas de las estructuras.	139
Figura 6.12 Comparación de cortante de piso de las estructuras.....	140
Figura 6.13 Desplazamiento máximo de la estructura aislada.	141
Figura 6.14 Deriva máxima de la estructura aislada.....	141
Figura 6.15 Curva de histéresis del aislador LRB bajo efectos de sismo de diseño. .	142
Figura 6.16 Desplazamiento máximo de la estructura aislada.	142
Figura 6.17 Deriva máxima de la estructura aislada.....	143
Figura 6.18 Curva de histéresis del aislador LRB bajo efectos de sismo de diseño. .	144



Índice de tablas:

Tabla 3.1.- ASCE 7-10 Tabla 17.5-1 Coeficiente de amortiguamiento.	48
Tabla 3-2 Coeficiente f_1 para aisladores circulares. (Michael C. Constantinou et al. 2011).	75
Tabla 3-4 Coeficiente f_1 para aisladores circulares con núcleo ubicada en la superficie exterior. (Michael C. Constantinou et al. 2011).	76
Tabla 3-5 Coeficiente f_2 para aisladores circulares. (Michael C. Constantinou et al. 2011).	77
Tabla 3-6 Coeficiente f_2 para aisladores circulares con núcleo ubicada en la superficie interior. (Michael C. Constantinou et al. 2011).	77
Tabla 3-7 Coeficiente f_2 para aisladores circulares con núcleo ubicada en la superficie exterior. (Michael C. Constantinou et al. 2011)	77
Tabla 4-1 Parámetros para el espectro de diseño.	83
Tabla 4-2 Regularidad estructural.	85
Tabla 4-3 Periodo aproximado por método 1. (NEC 2015).	85
Tabla 4-4 Cortante basal.	86
Tabla 4-5 Períodos de vibración.	87
Tabla 4-6 Derivas de piso.	88
Tabla 4-7 Derivas de piso con efecto P-Delta.	88
Tabla 4-8 Distribución de fuerzas laterales.	89
Tabla 4-9 Derivas de piso con efecto P-Delta.	89
Tabla 4-10 Factores de reducción de resistencia.	90
Tabla 4-11 Especificaciones técnicas de los materiales.	90
Tabla 4-12 Solicitaciones.	91
Tabla 4-13 Área de acero.	91
Tabla 4-14 Cálculo de refuerzo superior.	92
Tabla 4-15 Cálculo de refuerzo inferior.	92
Tabla 4-16 Cálculo de longitud de desarrollo.	92
Tabla 4-17 Cálculo de refuerzo transversal en rótulas plásticas.	92
	10



Tabla 4-18 Cálculo de refuerzo transversal en vano.	93
Tabla 4-19 Cálculo de torsión.	93
Tabla 4-20 Solicitaciones.	93
Tabla 4-21 Área de acero.	94
Tabla 4-22 Cálculo de refuerzo superior.	94
Tabla 4-23 Cálculo de refuerzo inferior.	94
Tabla 4-24 Cálculo de longitud de desarrollo.	95
Tabla 4-25 Cálculo de refuerzo transversal en rótulas plásticas.	95
Tabla 4-26 Cálculo de refuerzo transversal en vano.	95
Tabla 4-27 Cálculo de torsión.	96
Tabla 4-28 Datos para diseño de columnas (pisos 1-2-3).	96
Tabla 4-29 Datos para diseño de columnas (pisos 4-5).	97
Tabla 4-30 Armadura de flexión (pisos 1-2-3).	97
Tabla 4-31 Armadura de flexión (pisos 4-5).	98
Tabla 4-32 Armadura transversal (pisos 1-2-3).	99
Tabla 4-33 Armadura transversal (pisos 4-5).	99
Tabla 5.1 Fuerzas que se transmiten al sistema de aislación.	101
Tabla 5.2.- Parámetros iniciales.	102
Tabla 5.3.- Características objetivas.	103
Tabla 5.4.- Características del sistema de aislación.	103
Tabla 5.5.- Características de aisladores LRB.	104
Tabla 5.6.- Características de aisladores NRB.	104
Tabla 5.7 Tabla de resumen del diseño del sistema de aislación requerido y geometría calculada.	105
Tabla 5.8 Tabla de resumen del sistema de aislación bajo acción del sismo máximo probable.	106
Tabla 5.9 Período y frecuencia.	108
Tabla 5.10 Período y frecuencia.	109



Tabla 5.11 Período y frecuencia.	111
Tabla 5.12 Fuerzas y desplazamientos resultantes del análisis lineal del sistema de aislación.....	111
Tabla 5.11 Comparación de amortiguamiento.....	114
Tabla 5.12 Propiedades del sistema de aislación teórico y modelado.....	115
Tabla 5.13 Propiedades del sistema de aislación.	116
Tabla 5.14 Propiedades de los aisladores LRB.....	116
Tabla 5.15 Propiedades de los aisladores LRB.....	116
Tabla 5.18. Resultados de la estructura aislada.....	118
Tabla 5.19. Factores para el cálculo de los esfuerzos de corte.....	120
Tabla 5.20. Tabla de resumen sistema de aislación.....	121
Tabla 5.21. Tabla de resumen aisladores LRB.	122
Tabla 5.22. Tabla de resumen aisladores NRB.....	122
Tabla 5.23. Resultado de estructura aislada.	122
Tabla 5.24. Resultados de la estructura aislada.....	122
Tabla 5.25. Factores para el cálculo de los esfuerzos de corte.....	124
Tabla 6.1 Demanda máxima de elementos estructurales vigas (entrepiso).....	135
Tabla 6.2 Capacidad de elementos estructurales vigas (entrepiso)	136
Tabla 6.3 Capacidad de elementos estructurales vigas (cubierta)	136
Tabla 6.4 Capacidad de elementos estructurales vigas (entrepiso)	136



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Christian Adrián Tapia Delgado, autor del Trabajo de Titulación **"DISEÑO DE AISLADORES SÍSMICOS LRB Y ANALISIS POR DESEMPEÑO DE EDIFICIOS"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 abril 2017

Christian Adrián Tapia Delgado

C.I: 0105203194



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Luis David Veletanga Mena, autor del Trabajo de Titulación **"DISEÑO DE AISLADORES SÍSMICOS LRB Y ANALISIS POR DESEMPEÑO DE EDIFICIOS"**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 abril 2017

Luis David Veletanga Mena

C.I: 0104503495



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Christian Adrián Tapia Delgado, autor del Trabajo de Titulación **"DISEÑO DE AISLADORES SÍSMICOS LRB Y ANALISIS POR DESEMPEÑO DE EDIFICIOS"**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor/a

Cuenca, 12 abril 2017

Christian Adrián Tapia Delgado

C.I.: 0105203194



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Luis David Veletanga Mena, autor del Trabajo de Titulación **"DISEÑO DE AISLADORES SÍSMICOS LRB Y ANALISIS POR DESEMPEÑO DE EDIFICIOS"**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor/a

Cuenca, 12 abril 2017

Luis David Veletanga Mena

C.I: 0104503495



Dedicatoria:

Este trabajo, fruto de mi esfuerzo, lo dedico a mis padres Antonio & Cecilia quienes me han brindado su apoyo incondicional a lo largo de mi realización como ser humano y han formado en mí una persona de principios que puede alcanzar sus sueños.

A mis hermanas Jessenia y Valeria, quienes me han brindado todo su cariño en las diferentes etapas de mi vida.

Y finalmente al amor de mi vida, mi sobrina Isabella, quien desde hace cuatro años alegra todos y cada uno de mis días.

David

Este trabajo lo dedico a mis padres Efraín & Diana quienes me han llenado de enseñanzas, lecciones de vida y sobre todo amor inconmensurable para convertirme en el hombre que soy.

A mis abuelos, quienes han estado presentes a lo largo de todo el trayecto brindándome su apoyo incondicional.

A mi hermana Ivonne, por brindarme su apoyo y cariño para cumplir mis metas.

A mi sobrina Valentina, quien me llena de felicidad y ternura al verla crecer.

A la persona que me ha acompañado durante esta etapa de mi vida y que seguramente no será la única.

Christian



Agradecimientos:

Nuestro sentido agradecimiento:

*A nuestras familias que han sido el respaldo más importante para cumplir este
anhelado proyecto académico.*

*A los distingos catedráticos de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca
quienes nos han acompañado y formado durante el proceso de convertirse en
profesional.*

*Especialmente a nuestro director de tesis, docente y futuro colega Ing. Francisco
Flores Solano PhD. Quien nos ha guiado en el tramo final de nuestra meta.*

*Al Ing. Jorge Guillén MsC. Y Lcda. Rebeca Harris MsC. por el apoyo y consejos
brindados durante la realización de este trabajo.*

*A las grandes amistades que se han forjado en el camino y que seguramente
permanecerán por el resto de nuestras vidas.*



1. Introducción

1.1. Antecedentes y Justificación

Un sismo se define generalmente como el movimiento de la tierra producido por la liberación de energía acumulada hacia la superficie a causa de la ruptura o movimiento friccional de las placas tectónicas. Existen otras causas para desatar este movimiento de la masa terrestre menos comunes como: la deformación de estratos cercanos a una falla activa, procesos volcánicos, hundimiento por erosión de aguas subterráneas y explosiones producidas por el hombre. En el Ecuador la subducción (movimiento de la placa de Nazca en el sentido Oeste-Este por debajo de la placa continental) y las fallas geológicas son la principal causa de estos movimientos, ubicando al país en una zona de peligrosidad sísmica “alta” desde la costa pacífica a “baja” hacia el oriente. El sismo de mayor magnitud (8.8 Mw) en Ecuador con epicentro en Esmeraldas ocurrió el 31 de enero de 1906 y el más reciente de magnitud 7.8 (Mw) el 16 de abril de 2016, cuyo epicentro fue cerca de Pedernales, Manabí, a 20 km de profundidad devastando la ciudad y poblaciones aledañas de la región costera, generando preocupación en el país con respecto a la seguridad de las edificaciones antiguas y nuevas frente a futuros movimientos telúricos.

El daño producido por un evento sísmico ocasiona un costo elevado no solo a nivel de infraestructura sino también social. El daño en carreteras y puentes puede incrementar el tiempo en la atención que se requiera luego de ocurrido uno de estos eventos sísmicos, así como también a la economía del país en caso de ser una línea de vital importancia. Deslizamiento de masas de tierra durante un movimiento telúrico son muy comunes y provocan interrupción en líneas de comunicación, servicio eléctrico e incluso servicio de agua potable. En el caso de estructuras esenciales como hospitales, edificios gubernamentales, e infraestructuras que alberguen un gran número de personas el tipo de daño que produce un movimiento telúrico debería ser mínimo o nulo, puesto que dichas estructuras deben estar en operación para atender las necesidades de la ciudadanía después de un evento. Como consecuencia se han buscado metodologías de diseño en las cuales la protección de la vida, integridad y funcionalidad estructural son los objetivos principales para mitigar los efectos devastadores de fenómenos naturales como los sismos. Hoy en día el diseño por resistencia, ductilidad y disipación permiten que la estructura o un sistema complementario a éste pueda manejar de una u otra forma la energía transmitida por un evento de sísmico.



El diseño por resistencia involucra el dimensionamiento de elementos de tal forma que puedan soportar las cargas producidas por un evento sísmico en el rango elástico, es decir, que en cualquier punto del elemento la resistencia sea mayor a la solicitación. El diseño por ductilidad es uno de los métodos más usados en la actualidad. Este método permite a la estructura disipar energía a través de daño localizado en elementos estructurales debidamente diseñados como son las rótulas plásticas. El diseño por disipación contempla elementos o un conjunto de ellos llamados el sistema de control, cuyo objetivo específico es el de manejar las fuerzas sísmicas evitando que la estructura se vea afectada.

El diseño por disipación ha tenido mucha acogida en las últimas décadas en países con alta peligrosidad sísmica. Una de las metodologías más usadas en países desarrollados es el aislamiento basal. Este sistema desacopla la estructura del suelo aislando la misma de los efectos sísmicos transmitidos por este medio. “El aislamiento sísmico se basa en el concepto de reducir la demanda sísmica en vez de incrementar la capacidad de resistencia sísmica de una estructura” (Connor and Laflamme 2014). El sistema de aislamiento basal conformado por aisladores elastoméricos con núcleo de plomo LRB (por sus siglas en inglés Lead Rubber Bearing), es uno de los más empleados en países con alta peligrosidad sísmica como Nueva Zelanda (en donde fue desarrollado), Estados Unidos, Japón y Chile.

En el siguiente documento se recopilará la literatura bibliográfica sobre el estado de arte del diseño de aisladores, con el objetivo de elaborar una guía de diseño para edificios con aisladores tipo LRB.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Realizar una guía de diseño de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) para promover su utilización y hacer un análisis por desempeño de una estructura con aislamiento.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir los parámetros necesarios para el diseño del sistema de aislamiento con aisladores tipo LRB de edificaciones.
- Realizar una guía de diseño y modelamiento en ETABS de sistemas con aisladores del tipo LRB y aplicarlo a una estructura.
- Realizar un ejemplo de análisis por desempeño de una estructura aislada.



- Comentar los beneficios del aislamiento basal con aisladores LRB para la estructura seleccionada.

1.3. Organización del trabajo de titulación

El trabajo de titulación se encuentra organizado dentro de diferentes capítulos configurados de la siguiente manera:

Capítulo 2: Se establece las bases del aislamiento sísmico basal comentando su historia, definiendo su concepto, y las diferentes clases de sistemas. La aplicación de ciertos sistemas de aislamiento a estructuras en países desarrollados se cita dentro de este capítulo.

Capítulo 3: En este apartado se da a conocer el desarrollo de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB), como también los materiales que lo componen y su influencia en las propiedades mecánicas. Se define las características de su modelamiento e implicaciones. Se desarrolla una guía de diseño para aisladores LRB y sus verificaciones normadas bajo diferentes estados de carga.

Capítulo 4: Se diseña una estructura de manera tradicional (diseño por ductilidad) cumpliendo el reglamento establecido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 2015). Esta estructura será la estudiada para dimensionar el sistema de aislamiento.

Capítulo 5: En este capítulo se ejemplifica el diseño y modelamiento del sistema de aislación para la estructura dimensionada en el capítulo anterior, siguiendo la guía general de diseño desarrollada en el capítulo 3.

Capítulo 6: Se realizará un análisis por desempeño de la estructura aislada con el objetivo de analizar el comportamiento de la misma.



2. Aislamiento basal

En este capítulo se da a conocer una breve historia del aislamiento basal seguido del concepto que lo rige. Los fundamentos teóricos del sistema de aislamiento basal, ventajas y desventajas se mencionan en este apartado. Se expresa los diferentes tipos de aislamiento basal y la factibilidad de los mismo. La aplicación de aislamiento a estructuras en países desarrollado se presenta al final de este capítulo, demostrando el auge de la tecnología mencionada.

2.1. Historia y concepto

El primer registro de aislamiento sísmico es una patente de 1870 en San Francisco, Estados Unidos (Touaillon 1870), aunque en años cercanos existía información sobre el Profesor Jhon Milne de Ingeniería en Minas de la Universidad de Tokyo, en el cual ejemplifico el aislamiento de una estructura describiendo en 1885 su experimento a la Asociación Británica Para el Avance de la Ciencia (BA), y en 1886 reportó una nueva versión de su sistema debido a que en su primer acercamiento el rendimiento del edificio ante carga de viento no era suficientemente óptimo. En 1909 por medio de una carta el doctor J. A. Calantarients describió un método para la factibilidad constructiva de edificios en zonas de peligro sísmico mediante la inclusión de una articulación libre lubricada y una capa fina de arena, mica o talco, para reducir la magnitud de fuerzas transmitidas a la estructura aislada.

El aislamiento basal sísmico consiste en la instalación de un sistema para desacoplar la estructura de la cimentación con el fin de reducir el daño potencial que pueden ocasionar los movimientos sísmicos, alcanzando el objetivo mediante el incremento de la flexibilidad del sistema con un apropiado amortiguamiento, aunque esta tecnología se denomina nueva dentro del campo constructivo, esta puede encontrarse en diversas estructuras en donde han sido implementadas para solucionar una gran variedad de problemas sísmicos de diseño. En algunas ocasiones el aislamiento sísmico se considera como una opción más económica al momento de requerir cierto nivel de resistencia sísmica y brindar seguridad a estructuras, esta reducción en el costo se puede reflejar en la disminución de fuerzas sísmicas, ductilidad requerida, elementos resistentes más simples y deformaciones estructurales menores puesto que la energía del sismo se

concentra en el sistema de aislación. Usualmente la variación en costo de estructuras aisladas varía entre $\pm [5-10]\%$ con respecto a estructuras no aisladas.

2.2. Fundamentos

Las estructuras que poseen un periodo fundamental entre 0.1 y 1 segundos son particularmente vulnerables bajo eventos sísmicos, debido a que los periodos predominantes se encuentran dentro del rango con la mayor severidad que es de 0.2 a 0.6 segundos, como se puede observar en la figura 2.1, en la cual se podría desarrollar el fenómeno de resonancia en la estructura provocando daños mayores. Mediante el desacoplamiento de estructura (aislamiento basal) se defleca la energía de ingreso del movimiento sísmico a través de la dinámica del sistema elongando al periodo fuera del rango predominante. Este incremento en el periodo afecta al desplazamiento horizontal en donde el amortiguamiento añadido por el sistema corrige estos incrementos como se puede observar en la figura 2.2, además de reducir las demandas en los elementos estructurales. El enfoque del sistema de aislamiento radica en cómo minimizar la deriva y aceleración de piso, ya que son inversamente proporcionales en cuanto a solución se trata, derivas altas se pueden corregir mediante aumento de rigidez en la estructura, mientras que la aceleración de piso se puede corregir con una flexibilidad mayor de la estructura que empeorará el efecto de la deriva (Naeim and Kelly 1999). Estos sistemas se emplean particularmente empleándolo en estructuras relativamente rígidas con un periodo fundamental menor a 0.4 segundos (Skinner and McVerry 1975)

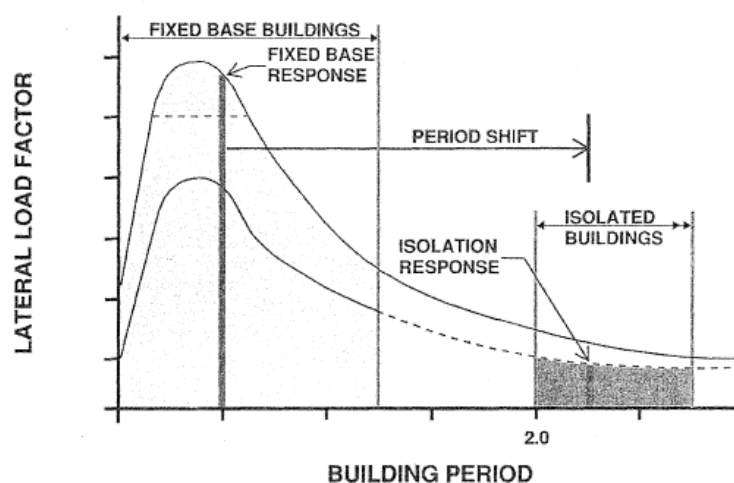


Figura 2.1.- Incremento del Periodo en Estructuras Aisladas IBC 2012 (Council. 2011)

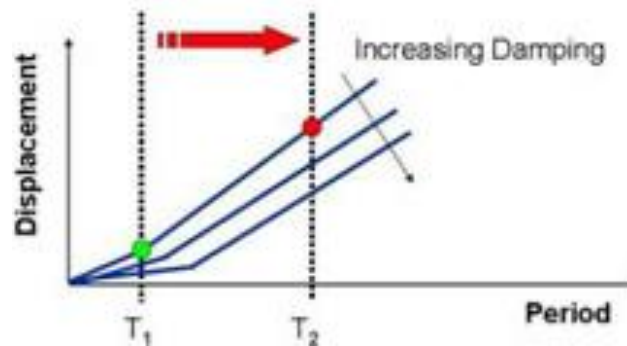


Figura 2.2.- Efecto del incremento de desplazamiento en el desplazamiento espectral.
(Christopoulos, Filiatrault, and Bertero 2006).

En el diseño tradicional la energía se disipa por daño y deformación de elementos estructurales formando rotulas plásticas en vigas y en la base de las columnas en el caso de sistemas especiales sismo resistente a momento. Estas deformaciones causan problemas a los elementos no estructurales que no se contemplan en el diseño sismo-resistente. A pesar de que el diseño tradicional permite que fuerzas sísmicas considerables sean transmitidas a la estructura el problema se produce en proveer la resistencia suficiente. Comparando la acción de un evento sísmico en una misma estructura con las dos metodologías de diseño, se obtiene que la estructura no aislada permite deformaciones y fisuramientos considerables, causando daño en la estructura a causa de la disipación de energía requerida para disipar la energía transmitida por el sismo. En la estructura aislada el desplazamiento horizontal ocurre en la interfaz de aislación reduciendo la transmisión de fuerzas a la estructura, la cual se mueve casi rígidamente como se puede observar en la Figura 2.3.

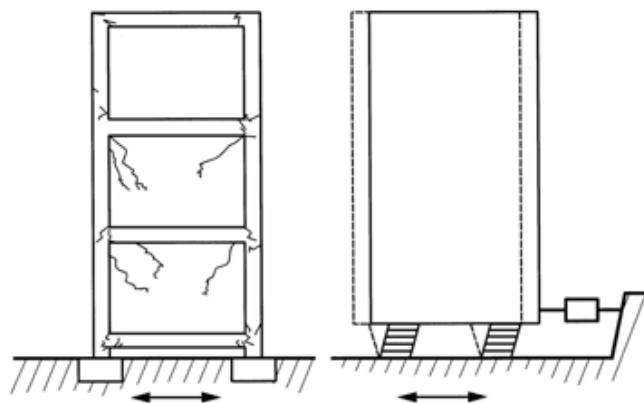




Figura 2.3.- Comparación de estructura tradicional con estructura aislada bajo efectos sísmicos. (T. E. Kelly et al. 2010).

Ventajas y desventajas

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas que presentan los sistemas de aislación basal.

Ventajas:

- Elonga el periodo de la estructura reduciendo la demanda sísmica y evitando fenómeno de resonancia.
- Presenta una técnica factible para minimizar derivas y aceleraciones de piso sin repercusiones entre estas.
- Elimina restricciones para el diseño arquitectónico. “Estos factores incluyen el suministro de un alto factor de ductilidad global, efectos dinámicos de irregularidades y accesorios, y deformación substancial del edificio” (Skinner and McVerry 1975).

Desventajas:

- Costo del sistema que sería justificado solo por estructuras de uso esencial o contenido valioso.
- Limitaciones de normas existentes sobreconservadoras.
- Complicación constructiva en el caso de ser una obra de refacción.

2.3. Tipos de Aislación Sísmica Basal

Actualmente las técnicas de aislamiento basal están dentro de 3 categorías (Patil and Reddy 2012); técnicas de aislamiento basal pasivo, aislamiento híbrido con dispositivos semi-activos, y aislamiento basal híbrido con disipadores de energía pasiva. Cada categoría contiene diferentes sistemas desarrollados a lo largo de la historia, a continuación, se nombrarán algunos de estos:

2.3.1. Sistemas de Aislamiento Basal Pasivo

- Capa de Lodo: Frank Lloyd Wright implementó esta técnica para el aislamiento del Hotel Imperial en Tokyo, el sistema consiste en pilotes de pequeña longitud separados en una capa de suelo de 8 pies (ft), subyacente por una capa gruesa de



lodo sobre estrato fuerte (roca); registros muestran que el edificio resistió un movimiento sísmico en 1923 (JANGID and DATTA 1995).

- Elastómero Laminado (NRB): Flexibilidad horizontal y gran rigidez vertical son sus principales características, este sistema ofrece grandes ventajas (Zhou et al. 2004) entre las cuales se encuentran:
 - Obtención de aislamiento efectivo.
 - Recuperación de desplazamiento.
 - Buena capacidad de tensión vertical.
- Elastómero Laminado con Núcleo de Plomo (LRB): La inserción del núcleo permite disipar energía, convirtiendo al aislador en un material de tipo bilineal. Edificios aislados con este tipo de sistema tuvieron un buen rendimiento durante el sismo de North Ridge en 1994 y Kobe en 1995.
- Soportes de Caucho de alto amortiguamiento: Conocido como KL301 producido en Bridgeston Corporation Limited, Japón, posee un módulo de cortante alrededor de 4300 kPa a esfuerzos pequeños, el cual decrece a 650 kPa con 50% de esfuerzo, 430 kPa al 100% de esfuerzo y 340 kPa al 150% de esfuerzo.
- Sistema de Fricción Pura: La disipación de energía provocada por el sismo se da a través de fuerzas de fricción, el bajo costo le da una característica ventajosa, aunque la incapacidad de recuperar el desplazamiento es su mayor desventaja.
- Sistema de Péndulo Friccionante: Este sistema logra el aislamiento deseado mediante gravedad y geometría basado en conceptos básicos del movimiento de péndulo, respondiendo al sismo con movimientos pequeños en donde la energía del sismo es absorbida mediante amortiguamiento de fricción.
- Pilotes Sleeved: Utilizado en estratos blandos de gran profundidad. El sistema fue implementado en Nueva Zelanda en 1983 en un edificio de 12 pisos de altura (Union House), en donde el periodo de la estructura fue elongado a 4 segundos.

- Material Geo-sintético: La idea de este sistema es utilizar material geo-sintético para desarrollar fricción con un polietileno molecular ultra pesado (Yegian and Kadakal 2004), lo cual provoca un coeficiente de fricción estático de 0.1 y 0.07 dinámico, mediante esta fricción el sistema puede disipar la energía producida por el sismo.

2.3.2. Sistemas de aislamiento híbrido con dispositivos semi-activos:

Los sistemas de aislación híbridos usan dispositivos de control activos/semi-activos y sistemas de aislación pasivos. El Centro Médico de la Armada Italiana, Italia, posee este sistema de aislación. Compuesto de un soporte de caucho de bajo amortiguamiento (LDRBs) actuando como aislador sísmico pasivo, y amortiguadores magnetoreológico actuando como dispositivos de control semiactivos (Satish Kumar S.R. 2007).

2.3.3. Aislador de base híbrido con disipadores de energía pasivos.

- Dispositivos de disipación de energía: Principalmente disipan la energía del terremoto y reducen el efecto del terremoto sobre la estructura. Los dispositivos pueden ser empleados en la base de la estructura o en lugares apropiados de la superestructura, pueden ser usados en combinación con técnicas de aislación de base pasiva.
- La respuesta de la estructura puede ser controlada usando amortiguadores viscosos elásticos (VEDs), fabricados de resortes lineales y amortiguadores provistos en paralelo y se usan generalmente en los arriostramientos de los pórticos o a nivel de piso (Datta 2008).
- Amortiguadores Elasto-plástico (EPDs): Están hechos de un pequeño número “x” en forma de placas, fluye a pequeñas deformaciones de este modo disipa gran cantidad de energía (Reddy G.R. 2007), (Parulekar Y.M. 2007).
- Amortiguador de extrusión de plomo (LEDs): Trabajan en el principio de la extrusión de plomo, absorben la energía de vibración mediante la deformación plástica del plomo, durante la cual la energía mecánica es transformada en calor,



el plomo se calienta y al ser extruido se recrystaliza inmediatamente y recobra sus propiedades mecánicas originales antes de la siguiente extrusión (Reddy G.R. 2007).

- Amortiguadores líquidos sincronizados (TLDs): Son envases de pared rígida llenos con líquido (generalmente de agua) para alcanzar la frecuencia del chapoteo del agua con la de la estructura. Están generalmente en la parte superior de la estructura. La energía de vibración es disipada con el chapoteo del agua (Reddy G.R. 2007).
- Amortiguadores con memoria de forma (SMADs): Conformados por alambres de una aleación de níquel y titanio con una propiedad pseudo-elástica por la cual la aleación recupera su forma inicial cuando se quita la carga externa, lo que permite que la estructura retorne a su posición original (Reddy G.R. 2007), (Parulekar Y.M. 2007).

2.4. Factibilidad

Para determinar si el sistema de aislamiento es factible, se deben de evaluar 3 condicionantes: necesidad, conveniencia, y costo. La necesidad surge de la peligrosidad sísmica por parte de la ubicación de la estructura y la importancia que posee. La conveniencia del sistema depende del tipo de suelo, su relación altura-ancho (por esfuerzos de tensión que se podrían ocasionar) y el impacto por carga de viento. El costo siempre será justificado si el contenido de la estructura es valioso, o si el tipo de estructura es de ocupación esencial.

2.5. Ejemplos de estructuras aisladas:

En los últimos años se ha observado la implementación y rendimiento de diferentes estructuras frente acciones sísmicas en variedad de condiciones con diferentes técnicas y métodos de disipación, lo que ha dado apertura a diferentes formas de alcanzar la seguridad en las estructuras. A continuación, se da a conocer algunos edificios conocidos que han empleado esta metodología de aislamiento basal sísmico.

- Hospital Universitario de California del Sur:



Figura 2.4.- Hospital Universitario de California del Sur “Datos del mapa ©2017 Google”

Es una estructura de 8 pisos apoyada sobre 149 aisladores del tipo NRB y LRB.

- Departamento de Bomberos de Comando y Control: Es una estructura de metal perimetral de dos pisos que utiliza 36 aisladores del tipo HDRB.
- Fábrica de manufactura de Evans y Sutherland:



Figura 2.5.-Fábrica de manufactura de Evans y Sutherland “Datos del mapa ©2017 Google”

Es un edificio de 4 plantas ubicado cerca de las fallas Warm Springs and East en la ciudad de lago salado. Esta estructura está apoyada sobre 98 aisladores del tipo LRB y NRB. El desplazamiento esperado para el sistema es de 23 cm a un periodo de 2.0 segundos.

- Edificio de la Ciudad de Lago Salado:



Figura 2.6.-Edificio de la Ciudad de Lago Salado “Datos del mapa ©2017 Google”

Esta estructura de 5 plantas fue construida entre 1892-1894, fue restaurado mediante la instalación de aisladores sísmicos (447 en total) del tipo LRB y NRB.

- El edificio Tōshin 24 Ohmori: Este edificio posee 9 plantas y se encuentra ubicado entre dos de las más congestionadas vías férreas en Tokyo, motivo por el cual el aislamiento sísmico debería cumplir la misión de reducir la vibración inducida por las mismas a más del movimiento sísmico. Una combinación de aisladores de goma y amortiguadores metálicos se empleó para dicho objetivo.

- Edificio Bridgestone Toranomon:



Figura 2.7.-Edificio Bridgestone Toranomon “Datos del mapa ©2017 Google”

Este edificio es un distribuidor mayoritario de aisladores de goma, el cual se encuentra aislado por 12 aisladores de goma, 25 amortiguadores metálicos y 8 aisladores viscosos.

- Palacio Municipal de San Francisco:



Figura 2.8.-Palacio Municipal de San Francisco “Datos del mapa ©2017 Google”

Restaurada en 1994 mediante 530 aisladores del tipo LRB. La instalación de los aisladores resulta muy compleja al apuntalar, cortar y transferir la carga de las columnas a soportes temporales.

- Hospital V.A. Long Beach:



Figura 2.9.-Hospital V.A. Long Beach “Datos del mapa ©2017 Google”

Estructura de 12 pisos aislada mediante 128 aisladores del tipo LRB y NRB, y 18 aisladores de fricción.

- Nuevo Hospital de Cuidados Médicos Mills-Península:



Figura 2.10.-Nuevo Hospital de Cuidados Médicos Mills-Península “Datos del mapa ©2017 Google”

Ubicado cerca de la falla de San Andrés, esta estructura posee 176 aisladores del tipo péndulo friccionante, el cual ha sido diseñado para permitir 30 pulgadas de desplazamiento en cualquier dirección.

- Cathedral of Christ the Light:

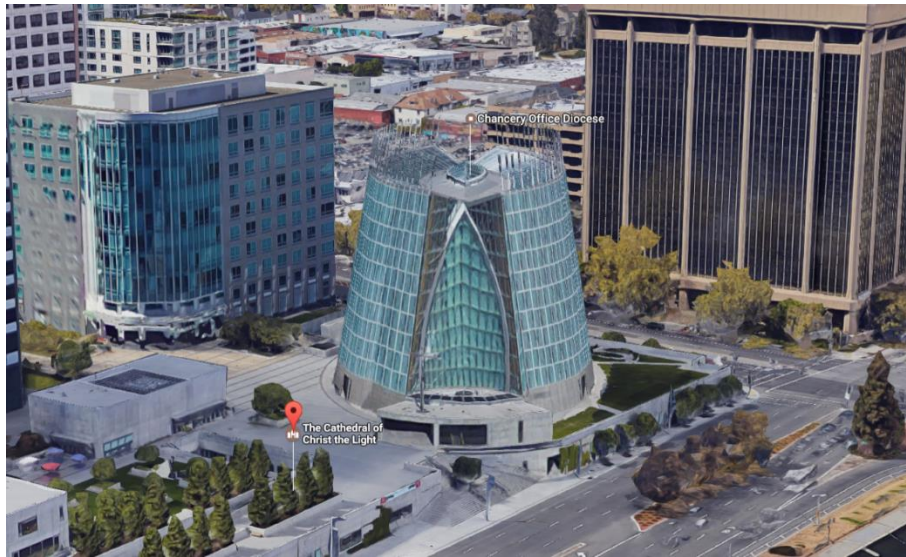


Figura 2.11.-Cathedral of Christ the Light “Datos del mapa ©2017 Google”

Ubicada en Oakland, ha sido diseñada para soportar un evento sísmico de 1000 años. Está equipada con 36 aisladores del tipo péndulo friccionante cóncavo, el cual permite un desplazamiento de 30 pulgadas.

- Foothill Communities Law and Justice Center: El primer edificio aislado en Estados Unidos y el primero en usar aisladores del tipo HDRB (98 en total) en el mundo. Ubicado a 21 km de la falla de San Andrés, el edificio consta de 5 plantas diseñado para resistir un evento sísmico de magnitud 8.3.

- El Centro de operaciones de emergencia en el condado de Los Ángeles:



Figura 2.12.-El Centro de operaciones de emergencia en el condado de Los Ángeles
“Datos del mapa ©2017 Google”

Estructura de metal de dos plantas aislada mediante 28 soportes de goma de alta resistencia.

- M. L. King/C. R. Drew Diagnostics Trauma Center:



Figura 2.13.-M. L. King/C. R. Drew Diagnostics Trauma Center “Datos del mapa ©2017 Google”



Estructura apoyada sobre 70 aisladores de goma de alta resistencia y 12 aisladores de fricción con placas de bronce que se desplazan sobre una superficie de acero inoxidable. Ubicada en Willowbrook, California cuya distancia a una falla activa es de tan solo 5km lo que permite q pueda generarse movimientos sísmicos de hasta 7.5Mw de magnitud.

- Traffic Management Center for Caltrans: Estructura de metal de dos plantas ubicado en Kearny Mesa, California. Aislada por soportes de goma de alta resistencia de 60 cm. El periodo de la estructura aislada es de 2.5 segundos y el desplazamiento bajo el sismo máximo probable es de 10 pulgadas. El cortante basal de la estructura es del 15% del peso estructural.
- West Japan Postal Computer Center: Estructura de 6 pisos ubicada en Sanda, Prefectura de Kobe. Esta estructura se encuentra soportada por 120 aisladores de goma con ciertos amortiguadores de metal. Posee un periodo aislado de casi 4 segundos y está a 30 km del epicentro del sismo Kobe de 1995. La aceleración registrada de 0.4g se redujo a 0.31g en el sexto piso. En marzo de 1997 el comité encargado de aprobar la construcción de dichas estructuras en Japón, recibió 393 solicitudes de las cuales 228 fueron de categoría residencial, 84 para oficinas, 31 hospitales y 22 edificios gubernamentales.



3. Diseño de aisladores LRB

En el siguiente capítulo se da a conocer los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, incluyendo los materiales que lo conforman y la variabilidad que estos pueden ocasionar. Ventajas y desventajas de la implementación de estos elementos se comenta de manera previa a la definición de sus propiedades mecánicas. Posteriormente se define el modelamiento del aislador LRB y las implicaciones que este conlleva para su diseño. Se configura una guía general de diseño de aisladores LRB y verificaciones de seguridad pertinentes. Se añade el proceso de dimensionamiento del sistema de aislación de forma desglosada para su correcta interpretación.

3.1. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB)

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, LRB (por sus siglas en inglés Lead Rubber Bearing), fueron desarrollados en 1975 (W. H. Robinson and Tucker 1976) siendo la Estación de Policía William Clayton en Wellington Nueva Zelanda (1981) el primer edificio que implemento el sistema (Charleson, Wright, and Skinner 1987) y del cual se ha desarrollado múltiples investigaciones analizando el comportamiento del aislador (W. Robinson and Tucker 1981).

Los aisladores están formados por un conjunto de láminas de goma (elastómero) con placas de acero intercaladas entre sí, logrando la adherencia de estos materiales gracias a la vulcanización de la goma al aplicar presión a alta temperatura en el momento de su manufacturación. La fuerza de adhesión de estos materiales esta normada mediante el ensayo ASTM D429 Método B, este conjunto de láminas incluye un núcleo de plomo extruido generalmente de forma circular. El elastómero (compuesto en el cual no se incluyen metales) es un vulcanizado, es decir, un polímero elástico o goma, compuesto normalmente de carbono, hidrógeno, oxígeno o silicio cuya característica principal es su alta elasticidad y flexibilidad frente a cargas antes de fracturarse. Muchas de las razones por las cuales el plomo se utiliza como núcleo en este tipo de aisladores son la fluencia del mismo bajo esfuerzos de corte con deformaciones relativamente bajas, comportándose como un sólido elásto-plástico, la restauración de sus propiedades mecánicas (Choun, Park, and Choi 2014) durante la deformación del mismo a temperatura ambiente le otorga buenas características de fatiga y existe gran disponibilidad del

material de gran pureza, consiguiendo un material viable para utilizarlo. De acuerdo con estudios realizados (W. Robinson and Tucker 1981) se conoce que el plomo es un material trabajado al caliente en temperatura ambiente, por lo que los procesos mediante los cuales el plomo recupera las características mecánicas bajo deformación plástica son: endurecimiento por deformación, recristalización (formación de nuevos granos no deformados) y crecimiento de granos.

La flexibilidad del elastómero permite grandes desplazamientos laterales, y las placas de acero proporcionan al conjunto gran rigidez vertical, a este se realiza uno o varios orificios circulares, por el cual se procede a insertar el núcleo de plomo de un ancho mayor al del orificio para lograr confinamiento, comúnmente de 1% más en volumen del orificio asegurando que funcione en conjunto. El núcleo de plomo proporciona una capacidad adicional de disipar energía sobre el elastómero, así como también aporta a la rigidez vertical del conjunto, en la figura 2.14 se puede observar la configuración de un aislador LRB.

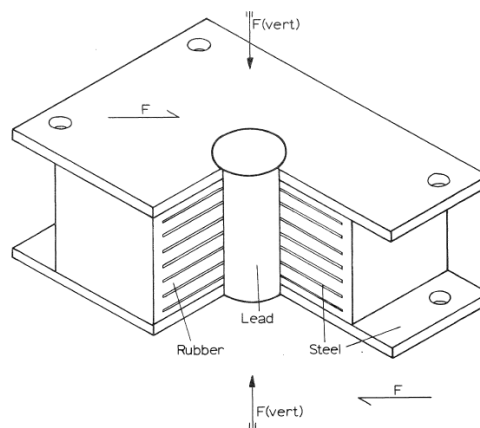


Figura 1.14.- Aislador elastomérico con núcleo de plomo. (W. H. Robinson and Tucker 1976).

El comportamiento del aislador elastomérico con núcleo de plomo depende de la fuerza lateral a la que se le somete, cuando la carga lateral es baja esta será absorbida por el núcleo de plomo manteniendo el sistema en la zona elástica, al aumentar la carga lateral el núcleo de plomo comienza a experimentar deformación hasta un punto en el cual comienza a fluir y disipar energía.



Ventajas y desventajas

A continuación, se exponen las ventajas y desventajas que presentan los sistemas de aislación basal con aisladores LRB.

Ventajas:

- Una de las mayores características de los aisladores de goma es la relación de deformación lateral respecto del espesor de caucho que puede alcanzar valores de 150% para sismo de diseño y hasta 250% para sismo máximo probable.
- Presenta una solución económicamente viable al soportar la estructura y proveer fuerza de amortiguamiento en todas las direcciones del plano horizontal para mitigar los efectos sísmicos.
- La recuperación de las propiedades mecánicas del plomo permite que el aislador pueda disipar energía mediante la fluencia de este material. En estudios realizados los aisladores sometidos a carga cíclica (Tyler and Robinson 1984) han mostrado soportar hasta 100 ciclos a deformaciones entre 25 a 200 %.
- Permite una amplia gama de elección en rigidez y amortiguamiento.

Desventajas:

- Hay que tener en cuenta que estos tipos de aisladores de base no deben ser usados en edificios con un gran valor de relación altura/ancho por problemas de incremento en esfuerzos de flexión. La mayoría de sistemas de aislamiento están diseñados para trabajar bajo cargas de compresión, los que resisten fuerzas de tensión de ser el caso se ven afectados bajo el fenómeno de cavitación, el cuál a bajos esfuerzos reduce la rigidez del aislador. Si el edificio depende de un sistema de elementos que trabajen a tensión este tipo de sistema no resulta práctico, pues su dimensionamiento para resistir estos esfuerzos no es económico.



- La instalación de los aisladores en la restauración de estructuras ha demostrado ser de gran complejidad ya que también requiere apuntalar y cortar columnas al igual que transferir las cargas a soportes temporales. Esto ha sido demostrado en la restauración del Palacio Municipal de Oakland que se completó en 1995.
- Limitación del avance tecnológico de este tipo de sistemas por normativas sobre-conservadoras.

3.2. Variabilidad de las propiedades mecánicas:

Las propiedades mecánicas de los aisladores son influenciados (Choun, Park, and Choi 2014) por varios factores:

- En el proceso de fabricación:

Debido a la materia prima y dosificación: Varios aditivos son ingresados a la mezcla para obtener un material de mejor comportamiento como retardantes, antioxidantes, refuerzo, aceites y colorantes los cuales influyen en las propiedades mecánicas del elastómero. La Norma ISO 22762-3 detalla las tolerancias para el fabricante de estos aisladores con la finalidad de aplicación en edificios.
- Envejecimiento y Condiciones Ambientales: Factores químicos como la oxidación térmica (endurecimiento del elastómero), irradiación ultravioleta, ozono (Morgan, Whittaker, and Thompson 2001), y factores ambientales provocan un cambio constante de las propiedades mecánicas durante el periodo de vida de este material. Los efectos de envejecimiento en sistemas LRB instalados en un edificio por 15 años (Shimoda et al. 2004) han dado como resultado un incremento de la rigidez a compresión de 15 a 23% y la rigidez a corte de 9%, sin embargo, la fuerza de fluencia incrementó de 0.7 a 3% en este lapso de tiempo.
- Efectos de Temperatura: Las bajas temperaturas incrementan la rigidez y fuerza de los soportes de caucho que pueden estimarse mediante las formulas dadas en O. Hasegawa, I. Shimoda, and M. Ikenaga, “*Characteristic of Lead Rubber Bearing by Temperature*”, 1997 tomando en cuenta coeficientes de modificación



por temperatura que están dados en Michalakis C Constantinou “*Effects of mechanical property variability in lead rubber bearings on the response of seismic isolation system for different ground motions*”, 2014 para los sistemas LRB.

3.3. Características mecánicas de los aisladores:

Módulo de corte (G_e): Rigidez que posee un material al deformarse bajo fuerzas de corte, los aisladores NRB (Natural Rubber Bearing) por sus siglas en inglés y LRB se fabrican usualmente con un material cuyo módulo de corte se encuentra entre 0.4 a 1 MPa para una deformación del 100%.

Rigidez horizontal (K_H): El aislador de goma puede aproximarse como una viga vertical de corte (Skinner et al. 1980), ya que las láminas de acero vulcanizadas inhiben las deformaciones de flexión permitiendo deformaciones por corte, esta propiedad es una de las más importantes para el diseño del aislador.

$$K_H = \frac{G_e A}{t_r}$$

Donde:

G_e =Módulo de corte del elastómero.

A = Área de la sección de goma.

t_r = Altura total de goma del aislador.

La altura total de las capas de goma se obtiene de la relación que guarda la deformación de corte máxima (γ), con el desplazamiento de diseño del aislador (D) (T. E. Kelly et al. 2010) que para sismo de diseño puede llegar a valores máximos de 150%.

$$\gamma = \frac{D}{t_r}$$

Rigidez vertical (K_v): La expresión de esta rigidez se puede simplificar de acuerdo a la teoría elástica lineal (J. M. Kelly 1993) como:

$$K_v = \frac{E_c A_{acero}}{t_r}$$



Donde:

E_c =Módulo de compresión instantáneo del compuesto elastómero-acero

A_{acero} =Sección de la lámina de acero

Factor de Forma (S): Relación de aspecto geométrico que involucra el área de elastómero que se encuentra cargado respecto del área de elastómero libre de carga.

$$S = \frac{\text{área cargada}}{\text{área no cargada}}$$

En el caso de un aislador del tipo circular se tiene que para una capa de goma de radio r y espesor t el factor de forma está definido como:

$$S = \frac{\pi r^2}{2\pi r * t}$$

Módulo de compresión (E_c): El valor del módulo de compresión para una sola capa de goma se define mediante el factor de forma. Para una capa de goma circular completa (sin orificio central) , utilizando teoría elástica lineal, las suposiciones ad hoc para compresión directa y la suposición de incompresibilidad del elemento (J. M. Kelly 1997) se obtiene que el módulo de compresión para una capa circular es:

$$E_c = 6G_e S^2$$

En el caso de aisladores con núcleo de plomo (LRB) se debe considerar la disminución en la sección a causa del orificio para el cálculo del factor de forma y por ende del módulo de compresión. Se puede introducir un factor dentro de la ecuación anterior de módulo de compresión que permita realizar esta disminución considerando la relación de diámetros a causa del orificio; a como el diámetro del núcleo (interno) y b del elastómero (externo). Al graficar el módulo de compresión como una función dependiente de la relación geométrica del elastómero y su núcleo (λ) se obtiene que conforme λ crece el módulo de compresión tiende a 2/3 de su valor original (sin considerar el orificio $6G_e S^2$) como se muestra en la figura 2.15.

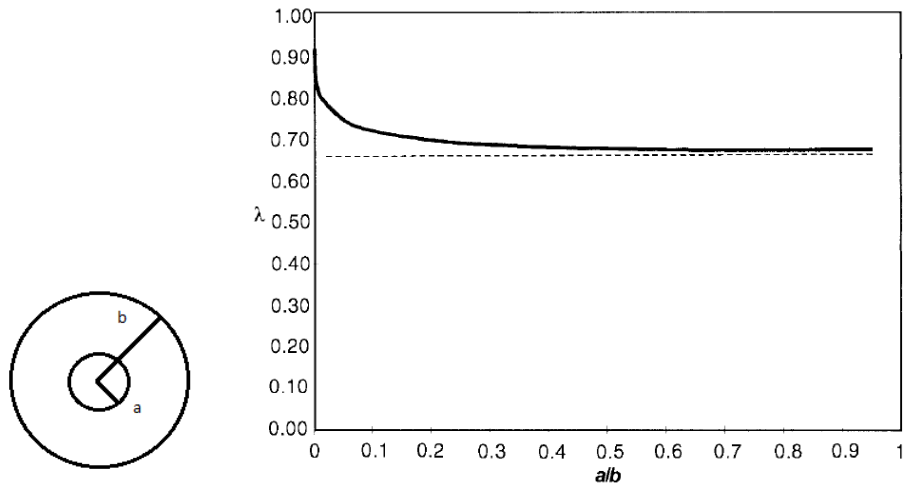


Figura 2.15.- Módulo de compresión para elastómeros con núcleo de plomo. (Naeim and Kelly 1999).

$$E_c = 6\lambda G_e S^2$$

Donde:

$$\lambda = \frac{b^2 + a^2 - \left[\frac{b^2 - a^2}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \right]}{(b - a)^2}$$

Analizando la expresión anterior se puede tomar el módulo de corte para aisladores de tipo LRB como:

$$E_c = 4G_e S^2$$

Capacidad de Carga: Considerando el elastómero como incompresible, una deformación vertical de compresión ocasiona el abultamiento de la capa en una cantidad proporcional a la distancia hacia el centro. Aproximando el abultamiento mediante una parábola (figura 2.16) se obtiene el esfuerzo de corte máximo del elastómero de volumen constante. Asumiendo que el material es linealmente elástico el esfuerzo de corte se puede relacionar a la deformación de corte y utilizando la condición de incompresibilidad que conlleva a la expresión de presión (J. M. Kelly 1997) para el elemento se tiene:

$$\gamma_{m\acute{a}x} = 6S\varepsilon_z.$$

Donde:

t =Espesor de la capa de goma

D =Diámetro de la capa de goma

ε_z = Deformación vertical ($\Delta t/t$)

p =Distribución de presión

La presión máxima del aislador considerando la distribución parabólica (J. M. Kelly 1997) es:

$$p_o = 2G_e S \gamma_{m\acute{a}x}$$

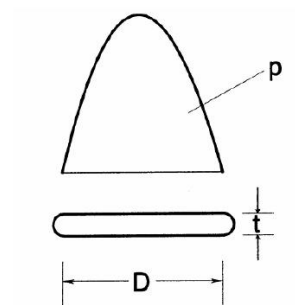


Figura 2.16.- Distribución de presión parabólica para una capa de elastómero. (T. E. Kelly et al. 2010).

3.4. Modelamiento

Los aisladores con núcleo de plomo producen una curva de histéresis con una combinación de relaciones lineal elástica – deformación y perfectamente elástica – deformación. Esto se debe a la combinación del elastómero y el plomo como núcleo. Se puede considerar que la curva fuerza-deformación (histéresis) equivale a la superposición de rigidez de estos elementos, la rigidez inicial (elástica) viene dada por el núcleo de plomo con aportación de rigidez por parte del elastómero, y la rigidez inelástica (post-fluencia) es dada por el elastómero (W. Robinson and Tucker 1981).

El aislador se modela como un elemento bilineal, tal que el área de la curva de histéresis sea igual al área del modelo (figura 3.1).

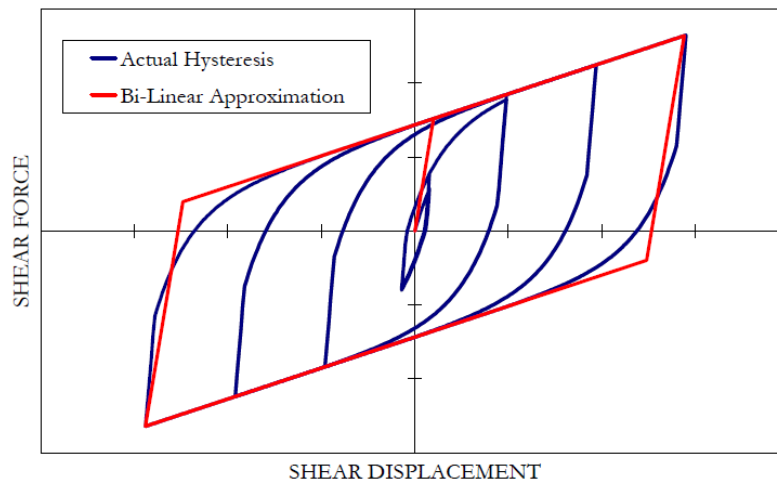


Figura 3.1.- Curva de histéresis del aislador LRB. (T. E. Kelly et al. 2010).

3.4.1. Implicaciones del modelo bilineal

El modelamiento bilineal del aislador depende de 3 características específicas como se muestra en la figura 3.2:

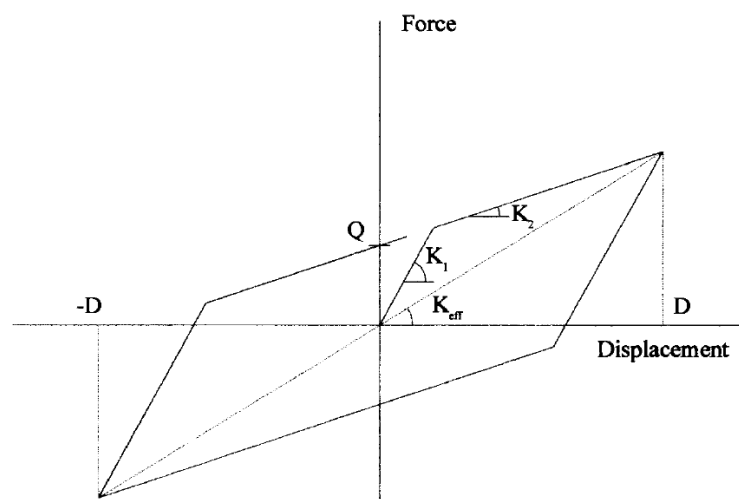


Fig. 5.4 Parameters of basic hysteresis loop for example problem.

Figura 3.2.- Características del modelo bilineal del aislador LRB. (Naeim and Kelly 1999).

Rigidez inicial (k_1): Usualmente tomada como un múltiplo de la rigidez post-fluencia por la dificultad de cuantificarla y la introducción de variables en un proceso de cálculo.



Se puede aproximar el valor de esta rigidez mediante las propiedades específicas de los materiales definido en (Christopoulos, Filiatrault, and Bertero 2006) mediante el módulo de corte y área de los materiales que componen el aislador.

$$k_1 = \frac{1}{h} (G_p A_p + G_e A_e)$$

Rigidez post-fluencia (k_2): Esta se puede determinar fácilmente de la teoría elástica lineal a partir de las propiedades del elastómero mediante su módulo de corte como se ha establecido en la sección 2.8.

Fuerza característica (Q): Es la fuerza a desplazamiento cero, la intersección del eje de fuerzas con el ciclo de histéresis, a la cual se puede estimar fácilmente del esfuerzo de fluencia del plomo y su área.

$$Q = A_p * \sigma_p$$

Donde:

A_p =Área de plomo

σ_p =Esfuerzo de fluencia del plomo

De acuerdo con el modelo bilineal se define a la rigidez efectiva (k_{eff}) como la rigidez secante de los valores picos del ciclo de histéresis, determinado por deducción geométrica como la suma vectorial de las rigideces del sistema.

$$k_{eff} = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateo adyacente}} \rightarrow \frac{Fuerza_{m\acute{a}x}}{D}$$

$$Fuerza_{m\acute{a}x} = k_{eff} * D$$

$$Fuerza_{m\acute{a}x} = Q + k_2 D_y + k_2 (D - D_y)$$

$$k_{eff} D = Q + k_2 (D_y + D - D_y)$$

$$\therefore K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D}$$

Desplazamiento de fluencia (D_y): Este valor se determina a partir de parámetros principales como rigidez y fuerza característica.

$$\frac{Fuerza_{fluencia}}{D_y} = k_1 \quad y \quad Q + k_2 D_y = Fuerza_{fluencia}$$

$$\therefore D_y = \frac{Q}{k_1 - k_2}$$

Energía de disipación (W_D): La energía que disipa el aislador se puede tomar como el área del ciclo de histéresis del modelo bilineal.

$$W_D = 4Q(D - D_y)$$

Amortiguamiento (β): El modelamiento de aislador se considera de amortiguamiento viscoso razón por la cual se puede determinar el amortiguamiento efectivo como:

$$\beta = \frac{W_D}{2\pi k_{eff} D^2}$$

3.5. Proceso general de diseño del aislador

El modelo bilineal permite establecer las dimensiones de los aisladores si se conoce el desplazamiento, periodo de elongación y masa sísmica reactiva de la estructura que se desea aislar. El International Building Code (Council. 2011) sugiere determinar una serie de espectros de desplazamiento para el tipo de suelo donde se emplazará la obra con amortiguamiento variable; a través de esto se pretende obtener un desplazamiento de diseño con el que se pueda iniciar un proceso de dimensionamiento de los aisladores (Figura 3.3) y establecer así valores objetivos con una visión del desplazamiento que se puede obtener, sugiere también que el periodo de elongación se encuentre entre 2.5-3.5 segundos.

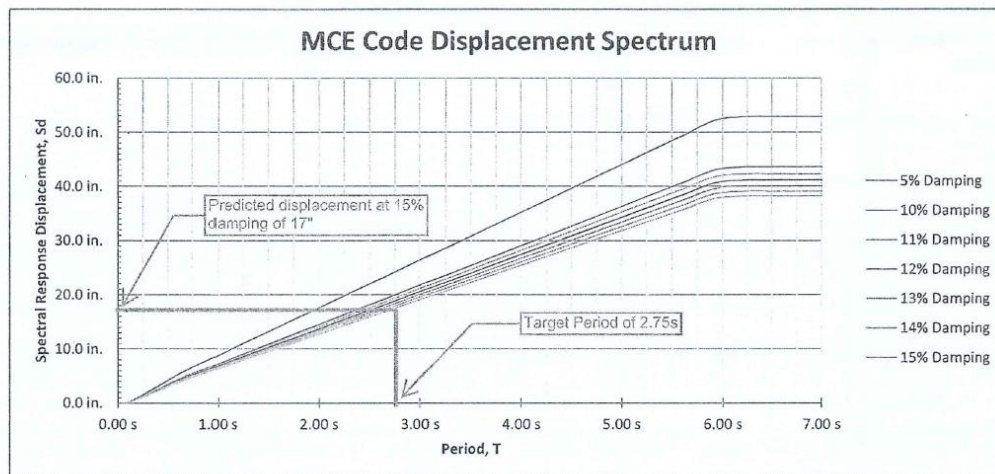


Figura 3.3.- Desplazamiento estimado de espectros de desplazamiento para sismo máximo. (Council. 2011).

La fórmula establecida en el código ASCE7-10 17.5.3.1 como desplazamiento mínimo de diseño tiene el mismo concepto, puesto que su formulación se basa en transformar la aceleración del espectro de diseño en un desplazamiento considerando el periodo y amortiguamiento objetivo del sistema de aislación, permitiendo así dimensionar el sistema de aislamiento con una idea del desplazamiento que se puede llegar a obtener para estas características deseadas.

$$D_d = \frac{g * S_{D1} * T_o}{4 * \pi^2 B_D}$$

donde:

g =aceleración debido a la gravedad

S_{D1} =Aceleración espectral de diseño con amortiguamiento de 5% en 1s

T_o =Periodo objetivo de la estructura a aislar

B_D =Coeficiente relacionado al amortiguamiento efectivo

Table 17.5-1 Damping Coefficient, B_D or B_M

Effective Damping, β_D or β_M (percentage of critical) ^{a,b}	B_D or B_M Factor
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

Tabla 3.1.- ASCE 7-10 Tabla 17.5-1 Coeficiente de amortiguamiento.

Con un periodo de elongación escogido como objetivo se puede determinar la rigidez necesaria del sistema de aislación para poder llegar a este. La masa de la estructura debe ser determinada como lo dice la normativa NEC 2015 6.1.7 o ASCE 710 12.7.2, definida como carga sísmica reactiva (peso de la estructura).

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff}}} \rightarrow K_{eff} = W * \left(\frac{2\pi}{T_o}\right)^2$$

Energía de disipación: El trabajo al caliente del núcleo de plomo permite disipar energía de manera cíclica como se pudo ver en la curva de histéresis mostrada en la figura 3.1. Con esta energía se obtiene un valor equivalente para determinar un amortiguamiento viscoso equivalente del sistema.

$$\frac{W_D}{2 * \pi * K_{eff} * D_d^2} = \beta$$

Donde:

W_D =energía de disipación

Al haber comenzado con un amortiguamiento como dato para el diseño, se puede estimar de esta formulación la energía de disipación del aislador para el periodo y amortiguamiento objetivo.

$$W_D = 2 * \pi * K_{eff} * \beta_o * D_d^2$$

Fuerza característica: El valor de esta fuerza puede estimarse muy bien a partir de las características del plomo y su dimensión de núcleo. Para poder obtener un

dimensionamiento se reemplaza el área del ciclo de histéresis en la formulación de amortiguamiento anterior.

$$Q = \frac{W_D}{4 * (D_d - D_y)}$$

Al poseer varias incógnitas en el dimensionamiento de los materiales del aislador, se aproxima la fuerza característica considerando desplazamiento de fluencia despreciable en un primer cálculo, esto se puede entender como una curva histerética rectangular que deberá ser deformada posteriormente para adaptarse al modelo bilineal.

$$Q_o = \frac{W_D}{4D_d}$$

Esto permite estimar una rigidez post-fluencia para continuar con el proceso de diseño.

$$k_2 = k_{eff} - \frac{Q}{D_d}$$

De igual manera al no conocer dimensiones del núcleo de plomo la rigidez inicial se estima como un múltiplo de la rigidez post-fluencia ya que la relación entre sus módulos de corte está en el orden de 10 a 15. Este múltiplo es de aproximadamente 10 para el pre-dimensionamiento de los aisladores (Christopoulos, Filiatrault, and Bertero 2006). La rigidez inicial ha sido establecida como un múltiplo de la rigidez post-fluencia, en donde para valores de desplazamiento menor al de fluencia del aislador, este se mantiene en una zona de comportamiento elástico en donde interviene la rigidez a corte del núcleo de plomo y del elastómero. Con valores de rigidez aproximada se puede determinar un desplazamiento de fluencia aproximado que depende de:

$$D_y = \frac{Q}{k_1 - k_2}$$

Una vez obtenido el valor de desplazamiento de fluencia se debe realizar un ajuste a las propiedades calculadas previamente hasta llegar a un valor de convergencia establecido, que en este caso de estudio es 0.0001. El proceso iterativo se expone a continuación:

$$Q_o \rightarrow K2 \rightarrow K1 \rightarrow Dy \rightarrow Q_o$$

$$Q_o = \frac{W_D}{4D_d}$$
$$k_2 = k_{eff} - \frac{Q_o}{D_d}$$
$$k_1 = 10 * k_2$$
$$D_y = \frac{Q_o}{k_1 - k_2}$$
$$Q_o = \frac{W_D}{4 * (D_d - D_y)}$$

Al haber alcanzado que el valor de fuerza característica converja, se ha logrado definir el modelo bilineal del aislador, para el periodo y amortiguamiento objetivo. Con estos valores definidos se pueden establecer las dimensiones de los materiales que conforman el aislador:

- **Área de plomo:** El área de plomo requerida para producir una fuerza característica (Q) se puede obtener mediante su esfuerzo de fluencia como:

$$A_p = \frac{Q}{F_y}$$

- **Diámetro del núcleo:** Dependiendo del número de aisladores del tipo LRB se determina el diámetro necesario para aportar el área requerida:

$$D_p = \sqrt{\frac{4 * A_p}{n_{LRB} * \pi}}$$

- **Área de Goma:** La rigidez post-fluencia depende únicamente del elastómero en el aislador, y es igual a la rigidez de corte. Esta depende del espesor total de las capas de goma la cual se puede tomar como un porcentaje del desplazamiento de diseño basado en la deformación de corte máximo del elastómero, o utilizar valores de un catálogo comercial.

$$K_2 = \frac{G_e * A_e}{t_r}$$

$$A_e = \frac{t_r}{G_e} K_2$$

- **Diámetro de goma:** Para el dimensionamiento del diámetro de goma se debe tomar en cuenta el área del núcleo que estará ubicado en el centro del mismo, así como también la disminución del 1% en volumen del orificio para asegurar el confinamiento (figura 3.4) y por ende la correcta modelación del aislador.

$$D_e = \sqrt{\frac{4(A_e + 0.99 * A_p)}{n_{LRB} * \pi}}$$

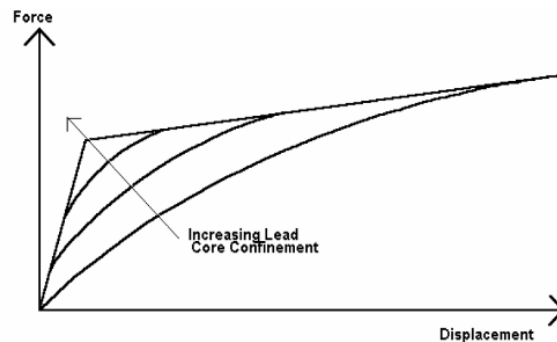


Figura 3.4.- (T. E. Kelly et al. 2010) Efecto del confinamiento del núcleo de plomo.

3.6. Verificación de funcionalidad y seguridad de los aisladores

Al comprender el nuevo concepto de diseño sismo resistente y tecnologías que se emplean para alcanzar dichos objetivos se han detallado verificaciones precisas para cada uno de los diseños con el fin de asegurar el correcto funcionamiento de la estructura bajo condiciones sísmicas cumpliendo el concepto moderno de diseño sismo resiste. Para los aisladores sísmicos de base no es la excepción y encontramos verificaciones puntuales (J. M. Kelly 1997), (Michalakis C Constantinou et al. 2011), (T. E. Kelly et al. 2010) que se deben realizar y cumplir para asegurar el correcto diseño del sistema de aislación y su implementación.



3.6.1. Fuerza restauradora

Fuerza necesaria que se requiere para no acumular desplazamientos permanentes dentro del sistema de aislación y permite que el sistema regrese a su posición original luego de un evento sísmico, el ASCE 7-10 17.2.4.4 especifica que el sistema de aislación debe ser configurada para producir una fuerza restauradora tal que la fuerza lateral en el desplazamiento de diseño sea por lo menos 0.025W mayor que la fuerza lateral al 50% del desplazamiento de diseño la cual se expresa (Michael C. Constantinou et al. 2011) mediante:

$$\frac{k_2 * D_d}{W} \geq 0.05$$

Estableciendo un periodo máximo del sistema de aislación para cumplir con la condición anterior.

$$T \leq 28 * \left(\frac{D_d}{g}\right)^{\frac{1}{2}}$$

De igual manera la ASSTHO 1999 y el Eurocódigo 8 establecen valores límites para la fuerza restauradora y el periodo máximo que puede alcanzar el sistema para garantizar el cumplimiento de la fuerza restauradora. La formulación más concisa para esta verificación se encuentra en (LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators, Michael C. Constantinou et al., 2011) en el cual se recomienda como limitaciones.

$$\mu = \frac{Q}{W}$$

$$\frac{k_2 * D_d}{W} \geq \sqrt{0.05 * \mu}$$

Donde:

μ =relación fuerza característica-carga sismica reactiva

Y como límite de periodo para asegurar la fuerza restauradora

$$T \leq 28 * \left(\frac{0.05}{\mu} \right)^{\frac{1}{4}} * \left(\frac{D_d}{g} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Esta relación equivale también al factor de fricción a velocidad cercana a cero en aisladores de fricción. Se puede observar que para valores de $\mu \geq 0.05$ el reglamento se vuelve más conservador, como por ejemplo el ASCE 7-10 que utiliza este valor.

3.6.2. Vuelco

La mecánica del aislamiento sísmico es el desacoplamiento de la superestructura de la cimentación mediante la incorporación de un sistema, por lo que el vuelco se convierte en una de las verificaciones más importantes para preservar la seguridad de la estructura. Su comprobación se realiza en estado no deformado y en estado deformado incluyendo los efectos sísmicos. El análisis se realiza verificando que el factor de seguridad al vuelco se cumpla, siendo la relación entre la carga crítica de pandeo sobre la carga máxima que se ejercerá sobre cada unidad de aislador durante la vida útil de la estructura.

La teoría de vuelco fue estudiada de Kelly, 1993 en su libro “Earthquake-Resistant Design with Rubber” que expresa cuyos fundamentos se basan en los aportes del trabajo de Haringx (On highly compressible helical springs and rubber rodsrods, and their application for vibration-free mountings, III. Philips Research Reports 1948) para luego asentar las bases del estudio de sistemas de aislación usando aisladores de caucho por Gent. (Elastic stability of rubber compression springs. J Mechanical Engineering Science 1964). Dentro de las consideraciones para la teoría de vuelco se toma la unidad aislador como una viga, y que la deformación asumida sea tal que las secciones planas normales al eje no deformado permanezcan planas (J. M. Kelly 1997), pero no necesariamente normales al eje deformado.

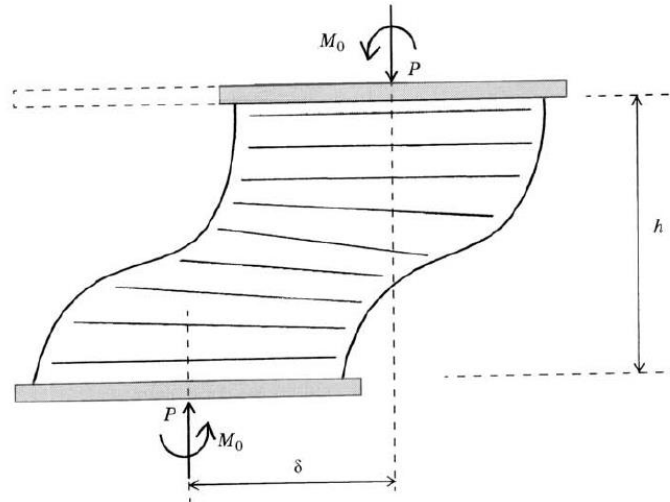


Figura 3.5.- Unidad de aislamiento en funcionamiento. (Naeim and Kelly 1999).

El cálculo de la carga crítica no deformada para la mayoría de los aisladores se realiza mediante el producto de la raíz cuadrada de la rigidez efectiva a cortante por unidad de longitud (P_S) y la raíz cuadrada de la carga de vuelco de Euler (P_E) para unidades de aislamiento tal que el factor de forma sea mayor o igual que 5 y que la carga de Euler sea mayor a la rigidez efectiva a cortante ($P_E \gg P_S$).

El resultado a la siguiente ecuación permite formular el valor de carga crítica:

$$P^2 + PP_S - P_S P_E = 0$$

$$P_{crit} = \frac{-P_S + \sqrt{P_S^2 + 4P_S P_E}}{2}$$

En donde al cumplir las condiciones $S > 5$ y $P_E \gg P_S$ se tiene:

$$P_{cr} = \sqrt{P_S * P_E}$$

El factor de forma de un aislador de base elastomérico es una propiedad esencial para la verificación a vuelco, en el caso estudiado los aisladores a utilizar son elastoméricos



circulares con y sin núcleo de plomo, para los cuales las siguientes expresiones son válidas:

$$S = \frac{A_{cargada}}{A_{libre}} = \frac{\pi \left(\frac{D_{NRB}}{2} \right)^2}{2 * \pi * \frac{D_{NRB}}{2}}$$

$$S_{NRB} = \frac{D_e}{4 * t}$$

Para los aisladores LRB

$$S_{LRB} = \frac{D_e - D_p}{4 * t}$$

El cálculo de la rigidez efectiva a cortante por unidad de longitud se obtiene del producto del módulo de corte y el área de corte efectivo (A_s) dependiendo solo del área de elastómero (A_e), sin considerar el aporte del núcleo en los aisladores LRB, se considera este incremento en la sección por las láminas de acero adheridas en el aislador.

$$A_s = A_e * \frac{h}{t_r}$$

$$P_s = G_e * A_s$$

Siendo (h) la altura total de elastómero y placas de acero.

La carga de vuelco de Euler de una columna sin deformación a corte está dada por:

$$P_E = \frac{\pi^2 * E_c * I * h}{3 * h^2 * t_r}$$

Donde el módulo de compresión (E_c) depende de la forma del aislador que:



Para aisladores NRB

$$E_c = 6 * G_e * S^2$$

La carga crítica de pandeo resulta

$$P_{cr_{NRB}} = \frac{\sqrt{2} * \pi * G_e * S * A_e * r}{t_r}$$

Para aisladores LRB

$$P_{cr_{LRB}} = \frac{2 * \pi * G_e * S * A_e * r}{\sqrt{3} * t_r}$$

Donde:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \rightarrow \text{radio de giro}$$

La norma americana para aisladores de puentes “LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators” (Michael C. Constantinou et al., 2011), establece una formula general para el cálculo de la carga de pandeo no deformada de los aisladores:

$$P_{cr} = \frac{\pi * \sqrt{\lambda} * G_e * S * A_e * r}{t_r}$$

En donde λ depende del tipo de aislador utilizado:

Para aisladores NRB

$$P_{cr_{NRB}} = 0.218 * \frac{G_e * D_{NRB}^4}{t * t_r}$$

Y para aisladores LRB

$$P_{crLRB} = 0.218 * \frac{G_e * D_{LRB}^4}{t * t_r} * \frac{\left(1 - \frac{D_p}{D_{LRB}}\right) * \left(1 - \frac{D_p^2}{D_{LRB}^2}\right)}{1 + \frac{D_p^2}{D_{LRB}^2}}$$

Cuando la relación entre la carga aplicada a un aislador y su carga de pandeo resulta considerable la rigidez horizontal del elemento se ve afectada (Naeim and Kelly 1999).

$$K_H = \frac{G_e A_s}{h} \left[1 - \left(\frac{P}{P_{crit}} \right)^2 \right]$$

Si la relación entre la carga que recibe una unidad de aislador y la carga crítica es menor que 0.32 entonces no se considera la influencia de la carga vertical en la rigidez horizontal, puesto que la fórmula contiene suficiente precisión.

Ahora se considera la carga de pandeo bajo combinación de esfuerzos (estado deformado), por carga a compresión y deformaciones horizontales. En el instante en el que el sistema de aislamiento comienza a funcionar, la parte superior de los aisladores se desplaza con respecto a la parte inferior anclada a la subestructura, por lo cual la carga de compresión estaría concentrada en un área reducida (A_r).

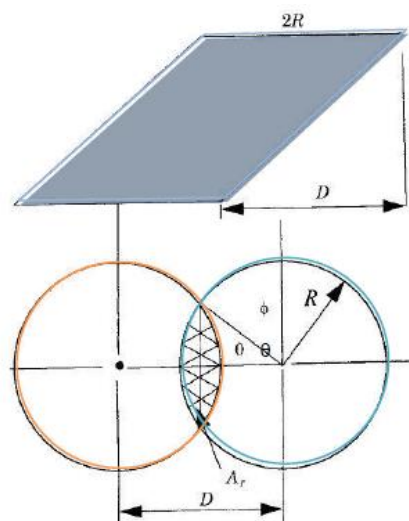


Figura 3.6.- Área de concentración de compresión bajo deformaciones horizontales.
(Naeim and Kelly 1999).

$$A_r = A_e \frac{\delta - \text{sen}(\delta)}{\pi}$$

$$\delta = 2 \arccos\left(\frac{D_d}{D_r}\right)$$

Obteniendo una carga crítica de pandeo con la implementación de deformaciones laterales.

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A_e}$$

3.6.3. Esfuerzos de corte

El análisis de aisladores elastoméricos bajo los esfuerzos de corte han sido simplificados por la aplicación del análisis de “solución por presión” planteada por Conversy, 1957 teniendo en cuenta las siguientes suposiciones:

- Todos los esfuerzos normales son iguales en cualquier punto dentro de las capas confinadas.
- Los puntos en una misma dirección tienen una dependencia parabólica en la misma.
- Secciones planas permanecerán siendo planas después de la deformación.
- Esfuerzos de corte en el plano horizontal son nulos.
- Todos los esfuerzos normales son nulos en las superficies laterales libres.

De acuerdo a esta teoría de presión se pueden establecer los valores de esfuerzos de corte por compresión, rotación y desplazamiento horizontal en los puntos donde cada uno de ellos son máximos.

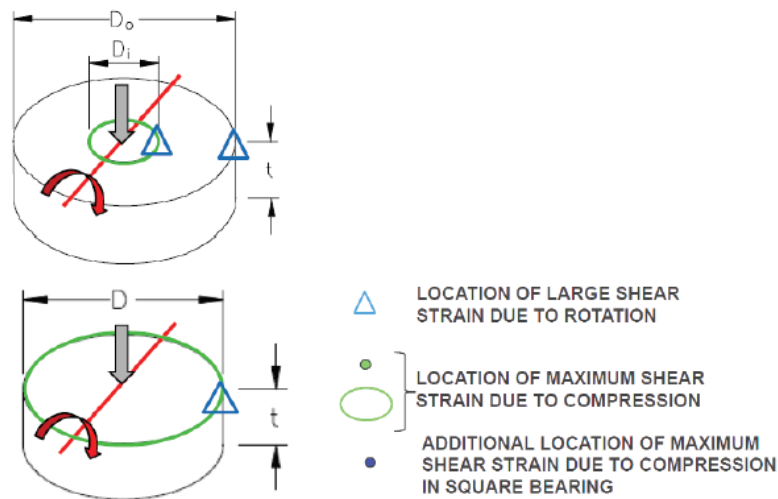


Figura 3.7.- Localidad de los esfuerzos máximos de corte en una sola capa de goma.
(Michael C. Constantinou et al. 2011).

La derivación matemática de las expresiones presentadas a continuación por su simplicidad se puede observar en el ANEXO A de la norma americana de procedimientos de diseño para aisladores de puentes (Michael C. Constantinou et al. 2011).

Esfuerzo de corte por compresión debido a carga P .

$$\gamma_c = \frac{P}{A * G_e * S} * f_1$$

Esfuerzo de corte por rotación debido al ángulo de giro θ entre la cara superior e inferior del aislador.

$$\gamma_r = \frac{D^2 * \theta}{t * t_r} * f_2$$

Donde

D =diámetro exterior de los aisladores NRB y LRB

Esfuerzo de corte por deformación lateral por el desplazamiento Δ entre la cara superior y la cara inferior de la unidad de aislamiento.

$$\gamma_s = \frac{\Delta}{t_r}$$

Esfuerzos en las placas de refuerzos: El cálculo de los esfuerzos que existen en las placas de refuerzo de los aisladores elastoméricos están basados en la solución elástica de la distribución de tensiones en placas producidas por esfuerzos de corte actuando en la interfaz caucho-placa y por compresión, desarrollado por Roeder, 1987.

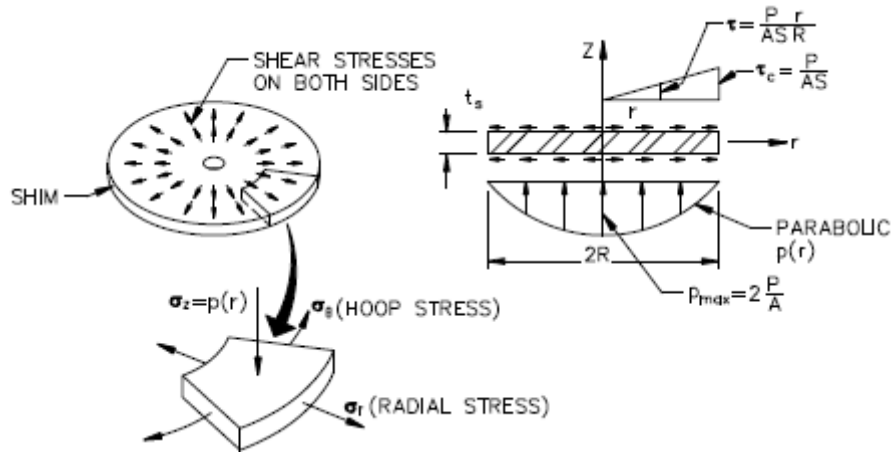


Figura 3.4.- Esfuerzos en las placas de refuerzo. (Michael C. Constantinou et al. 2011).

El espesor de las placas de refuerzo debe ser tal que:

$$t_s \geq \frac{\beta * t}{1.08 * f_y * \frac{A}{P_u} - 2}$$

Donde P_u es la carga mayorada, β es el coeficiente según el tipo de aislador para los aisladores NRB se toma el valor de 1.65 y para los LRB de 3, con un valor de esfuerzo de fluencia de 248MPa.

Para las verificaciones del sistema de aislación se han establecido valores límites que se deberán cumplir para obtener un diseño satisfactorio según las cargas actuantes.

3.6.3.1. Cargas de servicio

La primera comprobación se la realiza bajo cargas de servicio sin considerar acciones sísmicas. Los desplazamientos horizontales y rotacionales se calculan bajo acciones de cargas de servicio siendo Δ y θ respectivamente estos valores, con los cuales se procede a calcular:



- Esfuerzo de corte por compresión para la carga $P_u = 1.2P_D + 1.6P_L$

$$\gamma_{cs} = \frac{P_u}{A_r * G_e * S} * f_1 \leq 3.5$$

- Esfuerzo de corte por desplazamiento horizontal estático Δ sin carga sísmica

$$\gamma_{scs} = \frac{\Delta}{t_r}$$

- Esfuerzo de corte debido a rotación sin carga sísmica

$$\gamma_{rcs} = \frac{D^2 * \theta}{t * t_r} * f_2$$

- Estos esfuerzos debido a corte deben de cumplir bajo cargas de servicio

$$\gamma_{cs} + \gamma_{scs} + \gamma_{rcs} \leq 6.0$$

- Los espesores de las placas de refuerzo deberán cumplir con.

$$t_s \geq \frac{\beta * t}{1.08 * f_y * \frac{A_r}{P_u} - 2} \geq 1.9mm$$

- Mientras que para la verificación al vuelco se deberá cumplir con

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2.0$$

3.6.3.2. Sismo de diseño

Las comprobaciones bajo el sismo de diseño se realizarán con las cargas y deformaciones horizontales considerando las cargas sísmicas.



Para la carga axial última se considera la carga muerta, la carga viva sísmica P_{LSD} asumiendo el 50% de la carga viva y la carga axial debido al sismo de diseño P_{ESD} .

$$P_u = 1.2P_D + P_{LSD} + P_{ESD}$$

$$\gamma_{cSD} = \frac{P_u}{A_r * G_e * S} * f_1$$

Para el cálculo del esfuerzo de corte debido al desplazamiento lateral, el desplazamiento a ser considerado para el cálculo será la suma del 50% del desplazamiento estático más el desplazamiento de diseño.

$$\gamma_{sCS} = \frac{0.5\Delta + D_d}{t_r}$$

Para comprobar los esfuerzos de corte se debe de cumplir con

$$\gamma_{cSD} + \gamma_{sSD} + 0.5\gamma_{rCS} \leq 7.0$$

Para el espesor de las placas de refuerzo se verificará con la carga última baja el sismo de diseño.

$$t_s \geq \frac{\beta * t}{1.08 * f_y * \frac{A_r}{P_u} - 2} \geq 1.9mm$$

3.6.3.3. Sismo máximo probable

Para el sismo máximo considerado (MCE) se calcula la carga axial última P_u considerando la carga muerta, la carga viva sísmica P_{LMCE} asumiendo el 25% de la carga viva y la carga axial debido al sismo máximo considerado P_{EMCE} .

$$P_u = 1.2P_D + 0.25P_L + P_{EMCE}$$

$$\gamma_{cMCE} = \frac{P_u}{A_r * G_e * S} * f_1$$

Para el esfuerzo de corte por desplazamiento se considera el 25% del desplazamiento estático más el desplazamiento máximo.

$$\gamma_{SMCE} = \frac{0.25\Delta + D_{MCE}}{t_r}$$

La comprobación de los esfuerzos de corte se realiza cumpliendo con

$$\gamma_{CMCE} + \gamma_{SMCE} + 0.25\gamma_{rCS} \leq 9.0$$

La verificación del espesor de las placas de refuerzo se realiza bajo la acción de la carga axial última para el sismo máximo considerado.

$$t_s \geq \frac{\beta * t}{1.08 * f_{ye} * \frac{A_r}{P_u} - 2} \geq 1.9mm$$

Donde $f_{ye} = R_y * f_y$ que depende del material de la placa de refuerzo, para placas de acero de grado 50 se tiene $R_y = 1.1$ y para acero A36 $R_y = 1.3$

La verificación al vuelco se realiza cumpliendo dos condiciones:

$$P'_{cr} = P_{cr} * \frac{A_r}{A_e} \geq 0.15 * P_{cr}$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1$$

3.6.4. Esfuerzo de tensión

Esta característica depende de la forma del aislador, en la cual la falta de estudios definitivos permite utilizar la misma formulación que los esfuerzos de compresión. De acuerdo a ciertos estudios (T. E. Kelly et al. 2010) se ha podido determinar que para una tensión del orden $3G_e$ el fenómeno de cavitación puede darse en el aislador, esto reduce significativamente la rigidez del aislador pudiendo ocasionar el fracaso del elemento luego de ocurrido este fenómeno. Se toma como el siguiente valor como máximo de esfuerzo de tensión para sismo máximo probable.

$$\varepsilon_t \leq 3G_e$$



3.6.5. Otras normas

De acuerdo con la AASHTO 14.5.1P: Los límites de esfuerzo de corte se basan en un porcentaje de la elongación al rompimiento del elastómero.

Esfuerzo de corte debido a compresión:

$$\varepsilon_{sc} = 6S_i \varepsilon_c \quad \text{con } \varepsilon_c = \frac{P}{K_V * t}$$

Esfuerzo de corte debido a rotación:

$$\varepsilon_{sr} = \frac{B_b^2 * \theta}{2t * t_r}$$

Esfuerzo de corte por deformación lateral:

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\Delta}{t_r}$$

donde:

$$\varepsilon_{sc} \leq \frac{1}{3} \varepsilon_u \quad \text{Para cargas de servicio}$$

$$\varepsilon_{sc} + \varepsilon_{sh} \leq 0.75 \varepsilon_u \quad \text{Para cargas últimas incluyendo efectos sísmicos}$$

De acuerdo con la AASHTO 1999: Establece valores constantes como límites.

Esfuerzo de corte debido a compresión:

$$\varepsilon_{sc} = \frac{3SP}{2A_r G_e (1 + 2kS^2)} \quad \text{para } S < 15$$

$$\varepsilon_{sc} = \frac{3P(1 + \frac{8G_e k S^2}{E_\infty})}{4G_e k S A_r} \quad \text{para } S > 15$$



$\varepsilon_{s,s}$ → Esfuerzo por deformación no sísmica

$\varepsilon_{s,eq}$ → Esfuerzo por deformación sísmica

$$\varepsilon_{sc} \leq 2.5$$

$$\varepsilon_{sc} + \varepsilon_{s,s} + \varepsilon_{sr} \leq 5.0$$

$$\varepsilon_{sc} + \varepsilon_{s,eq} + 0.5\varepsilon_{sr} \leq 5.5$$

3.7. Proceso de diseño del sistema de aislación LRB:

El diseño del sistema de aislamiento comprende una serie de etapas con objetivos específicos encargados de definir el correcto dimensionamiento, funcionamiento y seguridad.

La primera etapa se encarga del dimensionamiento del sistema de aislación, partiendo de información característica del sitio, estructura a aislar y de las propiedades mecánicas de los materiales que componen el sistema de aislación escogido. El dimensionamiento de los aisladores se realiza con el desplazamiento del sismo de diseño.

La segunda etapa evalúa el comportamiento de la estructura bajo el sismo máximo probable con el sistema de aislamiento dimensionado, comprobando que el desplazamiento de este caso sea menor que la capacidad del sistema de aislación.

La tercera etapa consiste en realizar todas las verificaciones pertinentes para el correcto funcionamiento y seguridad del aislador, controlando los valores máximos establecidos por normativa para los diferentes casos de cargas.

3.7.1. Dimensionamiento del sistema de aislación.

Para el dimensionamiento del sistema se requiere de información específica como:

- Carga sísmica reactiva de la estructura a aislar. (W)
- Periodo de elongación objetivo. (T_o)
- Amortiguamiento efectivo. (β_o)



- Características mecánicas del suelo.
 - Coeficiente del sitio para periodo largo. (F_v)
- Especificaciones técnicas de los materiales del sistema de aislación.
 - Esfuerzo de fluencia del plomo. (F_y)
 - Módulo de Corte del elastómero. (G_e)
 - Relación rigidez inicial-pos fluencia. (r)

Mediante las cuales se obtiene:

- *Desplazamiento de diseño mínimo:*

$$D_d = \frac{g * S_{D1} * T_o}{4 * \pi^2 B_D}$$

donde:

g =aceleración debida a la gravedad

S_{D1} =Aceleración espectral de diseño con amortiguamiento de 5% en 1s

T_o =Periodo objetivo de la estructura a aislar

B_D =Coeficiente relacionado al amortiguamiento efectivo del sistema de aislación.

- *Rigidez efectiva del sistema de aislación:* Conociendo que $T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{eff}}}$ en donde W esta definida como la carga sísmica reactiva de la estructura expresada en kg , se puede despejar la rigidez necesaria del sistema de aislación para producir el periodo de elongación objetivo.

$$K_{eff} = W * \left(\frac{2\pi}{T_o}\right)^2$$

- *Energía disipada por el sistema:* Usualmente en el cálculo dinámico de estructuras se utiliza un amortiguamiento viscoso por su simplicidad y caracterización del amortiguamiento global de la estructura.

$$W_D = 2 * \pi * K_{eff} * \beta_o * D_d^2$$

- *Fuerza característica aproximada:* El primer valor de esta propiedad se determina considerando el amortiguador como un dispositivo rígido-plástico ideal, en donde, el desplazamiento de fluencia es nulo y cuyo ciclo de histéresis es rectangular.

$$Q_o = \frac{W_D}{4D_d}$$

- *Rigidez post-fluencia:* Al tener un primer valor de fuerza característica se procede a determinar el valor de rigidez post-fluencia en el modelo bilineal, cuya curva de histéresis es la de un paralelogramo.

$$k_2 = k_{eff} - \frac{Q}{D_d}$$


-
- *Rigidez elástica:* De acuerdo a la bibliografía estudiada se recomienda de manera práctica para el pre-dimensionamiento de los aisladores tomar la rigidez elástica como un múltiplo de la rigidez post-fluencia.

$$k_1 = 10 * k_2$$

- *Desplazamiento de fluencia:* Conociendo los valores de rigidez del modelo bilineal se determina el desplazamiento de fluencia.

$$D_y = \frac{Q}{k_1 - k_2}$$

Se debe tener presente que los valores de rigidez y desplazamiento de fluencia parten del valor de fuerza característica obtenido de una curva histerética rectangular, razón por la cual al haber determinado el desplazamiento de fluencia con este valor se debe ajustar las características dependientes del mismo. Este proceso se vuelve iterativo hasta que el valor de fuerza característica converja; se esquematiza el orden de ese proceso a continuación:

$$Q_o \rightarrow K_2 \rightarrow K_1 \rightarrow D_y \rightarrow Q_o$$


$$Q_o = \frac{W_D}{4D_d}$$

$$\begin{aligned} k_2 &= k_{eff} - \frac{Q_o}{D_d} \\ k_1 &= 10 * k_2 \\ D_y &= \frac{Q_o}{k_1 - k_2} \\ Q_{o2} &= \frac{W_D}{4 * (D_d - D_y)} \end{aligned}$$

El proceso se repite con $Q_o = Q_{o2}$ hasta que la diferencia de estos dos sea menor a una tolerancia establecida. En este caso, la tolerancia para la convergencia de estas características se toma como 0.0001.

- *Área de plomo:* El valor de fuerza característica permite obtener una estimación de área de plomo requerida mediante el esfuerzo de fluencia del núcleo.

$$A_p = \frac{Q}{F_y}$$

- *Diámetro del núcleo:* Dependiendo del número de aisladores del tipo LRB se determina diámetro necesario para aportar el área requerida:

$$D_p = \sqrt{\frac{4 * A_p}{n_{LRB} * \pi}}$$

- *Área de Goma:* La rigidez post-fluencia depende únicamente del elastómero en el aislador, y es igual a la rigidez de corte.

$$K_2 = \frac{G_e * A_e}{t_r}$$

$$A_e = \frac{t_r}{G_e} K_2$$

- *Diámetro de goma:* Para el dimensionamiento del diámetro de goma se debe tomar en cuenta el área del núcleo que estará ubicado en el centro del mismo, así como también la disminución del 1% en volumen del orificio para asegurar el confinamiento.

$$D_e = \sqrt{\frac{4(A_e + 0.99 * A_p)}{n_{LRB} * \pi}}$$

3.7.1.1. Sistemas de aislación con aisladores de tipo LRB y NRB

En ciertos casos el sistema de aislación de una estructura emplea una combinación de aisladores LRB y NRB, puesto que el dimensionamiento de sus materiales depende del número de estos; el área de plomo se reduce proporcionalmente al número de aisladores LRB lo que puede conllevar a dimensiones no prácticas. La inclusión de aisladores de tipo NRB permite proporcionar el área de plomo requerida con medidas prácticas para la instalación del sistema.

La rigidez post-fluencia está definida únicamente por el elastómero de los aisladores como se ha mostrado anteriormente. Al reemplazar aisladores del tipo LRB por aisladores del tipo NRB en el sistema de aislación se debe tomar en consideración que la rigidez post-fluencia del sistema de aislamiento será:

$$K_2 = K_{2LRB} + K_{2NRB}$$
$$K_2 = \frac{G_e * (A_{eLRB} + A_{eNRB})}{t_r}$$

La rigidez elástica también debe incluir el aporte del elastómero, esto se refleja fácilmente del modelo bilineal en donde se tiene que:

$$K_1 = Q + K_2 D_y$$

De igual manera la energía de disipación deberá ser modificada para incorporar el aporte de los aisladores NRB dentro de la rigidez efectiva.

$$\beta = \frac{W_D}{2\pi * K_{eff} * D_d^2}$$

3.7.2. Evaluación del comportamiento de la estructura bajo el sismo máximo probable con el sistema de aislamiento dimensionado

Partiendo del dimensionamiento de los aisladores de la etapa anterior se verifica que los esfuerzos y el desplazamiento de sismo máximo probable no excedan la capacidad del aislador. El límite de desplazamiento viene dado por el esfuerzo de corte del elastómero que para aisladores del tipo LRB se define como 250% bajo sismo máximo probable.

- *Desplazamiento máximo probable:* De acuerdo a la definición de sismo máximo probable prevista en la norma ASCE7-10, se establece que los movimientos sísmicos de suelo del sismo de diseño corresponden a 2/3 de los movimientos sísmicos del sismo máximo probable; lo cual se utiliza como una primera aproximación del desplazamiento.

$$D_{MCE} = \frac{3}{2} D_d$$

- *Rigidez efectiva del sistema:* Se determina la rigidez efectiva del sistema, incorporando la participación de aisladores del tipo NRB de ser el caso.

$$K_{eff} = \frac{Q}{D_{MCE}} + K_{2LRB} + K_{2NRB}$$

- *Energía de disipación del sistema:* La energía de disipación se obtiene como el área del ciclo de histéresis del modelo bilineal.

$$W_D = 4 * Q(D_{MCE} - D_y)$$

- Amortiguamiento efectivo del sistema.

$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2\pi * K_{eff} * D_{MCE}^2}$$

Si el sistema incorpora amortiguadores de goma NRB, el amortiguamiento efectivo del sistema deberá tomar en cuenta el aporte de rigidez como se estableció en el literal 3.5.1.1.

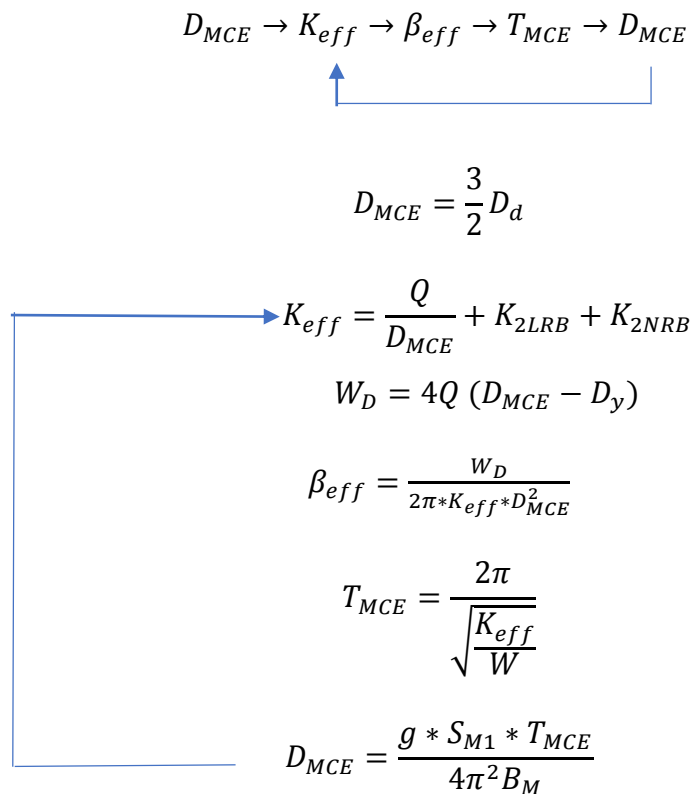
- Periodo de elongación:

$$T_{MCE} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K_{eff}}{W}}}$$

- *Desplazamiento máximo probable ajustado*: Una vez calculado el periodo de elongación se utiliza la fórmula de la normativa (ASCE 7-10) para determinar el desplazamiento de diseño.

$$D_{MCE2} = \frac{g * S_{M1} * T_{MCE}}{4\pi^2 B_M}$$

Siguiendo la misma metodología de iteración en la determinación del desplazamiento de fluencia en sismo de diseño, se procede a calcular el desplazamiento máximo probable hasta alcanzar una convergencia. El proceso se esquematiza continuación:





El proceso se repite hasta la convergencia del desplazamiento. En este caso, la tolerancia para la convergencia de estas características se toma como 0.0001. Se debe comprobar que $D_{MCE} < D_{m\acute{a}x.aislador}$.

3.7.3. Verificaciones

3.7.3.1. Fuerza restauradora

De acuerdo con ASCE 7-10 17.2.4.4 se debe cumplir que:

$$\frac{k_2 * D_d}{g * W} \geq 0.05$$

Estableciendo un periodo máximo del sistema de aislación para cumplir con la condición anterior:

$$T \leq 28 * \left(\frac{D_d}{g}\right)^{\frac{1}{2}}$$

De acuerdo con el Euro código se establece:

$$\mu = \frac{Q}{g * W}$$

$$\frac{k_2 * D_d}{g * W} \geq \sqrt{0.05 * \mu}$$

Y como límite de periodo para asegurar la fuerza restauradora:

$$T \leq 28 * \left(\frac{0.05}{\mu}\right)^{\frac{1}{4}} * \left(\frac{D_d}{g}\right)^{\frac{1}{2}}$$

3.7.3.2. Vuelco

- Factor de forma:

$$S_{LRB} = \frac{D_E - D_p}{4 * t}$$



$$S_{NRB} = \frac{D_E}{4 * t}$$

- Área de corte efectivo:

$$A_s = A_e * \frac{h}{t_r}$$

- Carga crítica de pandeo en estado no deformado:

- o De acuerdo con lo establecido por Kelly (1993):

$$P_{crLRB} = \frac{2 * \pi * G_e * S * A_e * r}{\sqrt{3} * t_r}$$

$$P_{crNRB} = \frac{\sqrt{2} * \pi * G_e * S * A_e * r}{t_r}$$

- o De acuerdo con Michael C. Constantinou et al., 2011 “LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators”, 2011.

$$P_{cr} = \frac{\pi * \sqrt{\lambda} * G_e * S * A_e * r}{t_r}$$

$$P_{crNRB} = 0.218 * \frac{G_e * D_{NRB}^4}{t * t_r}$$

$$P_{crLRB} = 0.218 * \frac{G_e * D_{LRB}^4}{t * t_r} * \frac{\left(1 - \frac{D_p}{D_{LRB}}\right) * \left(1 - \frac{D_p^2}{D_{LRB}^2}\right)}{1 + \frac{D_p^2}{D_{LRB}^2}}$$

- o Influencia de la carga vertical en la rigidez horizontal:



Si la carga aplicada sobre el aislador es menor que 0.32 veces la carga de vuelco la estimación de a rigidez post-fluencia del elastómero se considera aceptable, caso contrario se deberá corregir mediante:

$$K_2 = \frac{G_e * A_e}{t_r} \left[1 - \left(\frac{P}{P_{crit}} \right)^2 \right]$$

- Carga crítica de pandeo en estado deformado:
 - Área reducida: Según (LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators, Michael C. Constantinou et al., 2011):

$$A_r = A_e \frac{\delta - \text{sen}(\delta)}{\pi}$$

$$\delta = 2 \arccos \left(\frac{D_d}{D_r} \right)$$

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A_e}$$

3.7.3.3. Esfuerzos de corte

De acuerdo con (LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators, Michael C. Constantinou et al., 2011):

- Esfuerzo de corte debido a compresión:

$$\gamma_c = \frac{P}{A_r * G_e * S} * f_1$$

- Esfuerzo de corte por rotación:

$$\gamma_r = \frac{D^2 * \theta}{t * t_r} * f_2$$

- Esfuerzo de corte por deformación lateral:

$$\gamma_s = \frac{\Delta}{t_r}$$

S	K/Ge			
	2000	4000	6000	∞
5	1.02	1.01	1.01	1
7.5	1.05	1.03	1.02	1
10	1.1	1.05	1.03	1
12.5	1.15	1.08	1.05	1
15	1.2	1.11	1.07	1
17.5	1.27	1.14	1.1	1
20	1.34	1.18	1.13	1
22.5	1.41	1.23	1.16	1
25	1.49	1.27	1.19	1
27.5	1.57	1.32	1.23	1
30	1.66	1.37	1.26	1

Tabla 3-2 Coeficiente f1 para aisladores circulares. (Michael C. Constantinou et al. 2011).

S	DLRB/Dp = 10				DLRB/Dp = 5			
	K/Ge				K/Ge			
	2000	4000	6000	∞	2000	4000	6000	∞
5	3.18	3.18	3.18	3.18	2.34	2.33	2.33	2.33
7.5	3.19	3.18	3.18	3.18	2.35	2.34	2.34	2.33
10	3.19	3.18	3.18	3.18	2.36	2.35	2.34	2.33
12.5	3.2	3.19	3.18	3.18	2.38	2.35	2.35	2.33
15	3.21	3.19	3.19	3.18	2.41	2.37	2.35	2.33
17.5	3.22	3.2	3.19	3.18	2.44	2.38	2.36	2.33
20	3.25	3.2	3.19	3.18	2.47	2.4	2.37	2.33
22.5	3.27	3.21	3.2	3.18	2.51	2.42	2.39	2.33



25	3.3	3.23	3.21	3.18	2.55	2.44	2.4	2.33
27.5	3.34	3.24	3.21	3.18	2.6	2.46	2.42	2.33
30	3.38	3.26	3.22	3.18	2.66	2.49	2.43	2.33

Tabla 3-3 Coeficiente f_1 para aisladores circulares con núcleo ubicada en la superficie interior. (Michael C. Constantinou et al. 2011).

S	DLRB/Dp = 10				DLRB/Dp = 5			
	K/Ge				K/Ge			
	2000	4000	6000	∞	2000	4000	6000	∞
5	1.24	1.23	1.22	1.22	1.28	1.27	1.27	1.27
7.5	1.26	1.24	1.23	1.22	1.31	1.29	1.28	1.27
10	1.29	1.26	1.24	1.22	1.34	1.3	1.29	1.27
12.5	1.33	1.28	1.26	1.22	1.37	1.32	1.3	1.27
15	1.38	1.3	1.27	1.22	1.42	1.34	1.32	1.27
17.5	1.43	1.33	1.29	1.22	1.47	1.37	1.34	1.27
20	1.49	1.36	1.31	1.22	1.53	1.4	1.36	1.27
22.5	1.55	1.4	1.34	1.22	1.59	1.44	1.38	1.27
25	1.62	1.43	1.37	1.22	1.65	1.47	1.41	1.27
27.5	1.69	1.48	1.39	1.22	1.72	1.51	1.44	1.27
30	1.77	1.52	1.43	1.22	1.8	1.56	1.47	1.27

Tabla 3-4 Coeficiente f_1 para aisladores circulares con núcleo ubicada en la superficie exterior. (Michael C. Constantinou et al. 2011).

S	K/Ge			
	2000	4000	6000	∞
5	0.37	0.37	0.37	0.37
7.5	0.36	0.36	0.37	0.37
10	0.34	0.36	0.36	0.37
12.5	0.33	0.35	0.36	0.37
15	0.31	0.34	0.35	0.37

17.5	0.3	0.33	0.34	0.37
20	0.28	0.32	0.33	0.37
22.5	0.27	0.31	0.32	0.37
25	0.25	0.29	0.32	0.37
27.5	0.24	0.28	0.31	0.37
30	0.23	0.27	0.3	0.37

Tabla 3-5 Coeficiente f_2 para aisladores circulares. (Michael C. Constantinou et al. 2011).

S	DLRB/Dp = 10				DLRB/Dp = 5			
	K/Ge				K/Ge			
	2000	4000	6000	∞	2000	4000	6000	∞
5	0.3	0.31	0.31	0.32	0.31	0.31	0.32	0.33
20	0.18	0.23	0.26	0.33	0.18	0.23	0.25	0.33
30	0.12	0.19	0.23	0.33	0.12	0.18	0.22	0.33

Tabla 3-6 Coeficiente f_2 para aisladores circulares con núcleo ubicada en la superficie interior. (Michael C. Constantinou et al. 2011).

S	DLRB/Dp = 10				DLRB/Dp = 5			
	K/Ge				K/Ge			
	2000	4000	6000	∞	2000	4000	6000	∞
5	0.37	0.38	0.38	0.38	0.36	0.36	0.37	0.37
20	0.27	0.31	0.33	0.38	0.25	0.29	0.31	0.37
30	0.22	0.27	0.29	0.38	0.2	0.25	0.27	0.37

Tabla 3-7 Coeficiente f_2 para aisladores circulares con núcleo ubicada en la superficie exterior. (Michael C. Constantinou et al. 2011)

- Esfuerzo en placa de refuerzo:

$$t_s \geq \frac{\beta * t}{1.08 * f_y * \frac{A}{P_u} - 2}$$

Donde P_u es la carga mayorada y β es el coeficiente según el tipo de aislador para los aisladores NRB se toma el valor de 1.65 y para los LRB de 3, con un valor de esfuerzo de fluencia de 248MPa.

- Para cargas de servicio:

$$P_u = P_D + P_L$$

$$\gamma_{cs} = \frac{P_u}{A_r * G_e * S} * f_1 \leq 3.5$$

Δ desplazamiento horizontal estático.

$$\gamma_{scs} = \frac{\Delta}{t_r}$$

$$\gamma_{rcs} = \frac{D^2 * \theta}{t * t_r} * f_2$$

$$\gamma_c + \gamma_s + \gamma_r \leq 6$$

$$t_s \geq \frac{\beta * t}{1.08 * f_y * \frac{A_r}{P_u} - 2} \geq 1.9mm$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2.0$$

- Para sismo de diseño:

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 2.0$$

$$P_u = 1.2P_D + P_{LSD} + P_{ESD}$$

$$\gamma_{csd} = \frac{P_u}{A_r * G_e * S} * f_1$$

$$\gamma_{scs} = \frac{0.5\Delta + D_d}{t_r}$$

$$\gamma_{csd} + \gamma_{scs} + 0.5\gamma_{rcs} \leq 7.0$$



$$t_s \geq \frac{\beta * t}{1.08 * f_y * \frac{A_r}{P_u} - 2} \geq 1.9mm$$

- Para sismo máximo probable:

$$P_u = 1.2P_D + 0.25P_L + P_{EMCE}$$

$$\gamma_{MCE} = \frac{P_u}{A_r * G_e * S} * f_1$$

$$\gamma_{SMCE} = \frac{0.25\Delta + D_{MCE}}{t_r}$$

$$\gamma_{MCE} + \gamma_{SMCE} + 0.25\gamma_{rCS} \leq 9.0$$

$$t_s \geq \frac{\beta * t}{1.08 * f_{ye} * \frac{A_r}{P_u} - 2} \geq 1.9mm$$

Donde $f_{ye} = R_y * f_y$ que depende del material de la placa de refuerzo, para placas de acero de grado 50 se tiene $R_y = 1.1$ y para acero A36 $R_y = 1.3$

$$P'_{cr} = P_{cr} * \frac{A_r}{A_e} \geq 0.15 * P_{cr}$$

$$\frac{P'_{cr}}{P_u} \geq 1.1$$

- Esfuerzo de tensión:

$$\varepsilon_t \leq 3G_e$$

Mediante los cálculos realizados se obtiene el diseño, el número de aisladores de cada espécimen a utilizar y sus características geométricas cumpliendo estas en funcionamiento con lo requerido por la curva de disipación de energía y sus verificaciones de esfuerzos resistentes. Las dimensiones obtenidas de los aisladores no son generalmente comerciales, por lo que se puede solicitar la fabricación de los mismos al proveedor o



ajustar el cálculo a los aisladores comerciales en el cual dicho ajuste del diseño debe de satisfacer las necesidades de aislamiento que requiere la estructura. En este caso los valores de rigidez inicial, post-fluencia, fuerza característica y energía deben recalcularse para obtener el periodo y amortiguamiento que se logra. Esta decisión dependerá de la relación costo/beneficio que brinda cada una de las opciones.

4. Diseño tradicional

En este capítulo se dimensiona una estructura contemplando todas las especificaciones establecidas del reglamento constructivo en vigencia (NEC 2015)

4.1. Geometría y ubicación de la edificación

La configuración estructural consiste en vanos con luces de 5m en una superficie total de 25m x 10m como muestra la figura 4.1 y figura 4.2. Ubicada en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas. La edificación se eleva 5 niveles desde la rasante de suelo, con altura de entrepiso de 3m, terminando en el nivel superior con una cubierta de losa plana. La configuración en planta y elevación es de forma regular.

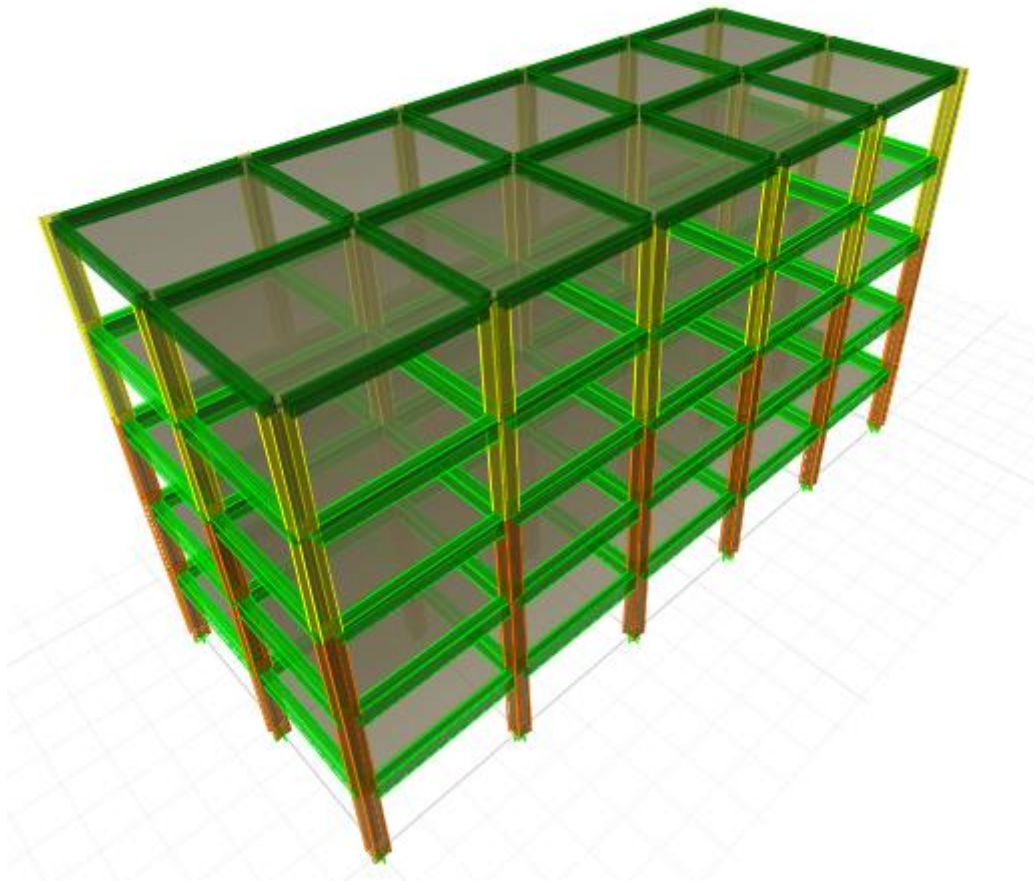


Figura 4.1.- Modelo tridimensional “Etabs 2015”.

El estudio estructural se realizará según las especificaciones técnicas y códigos de las normas:

- Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15
- Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural ACI 318-14

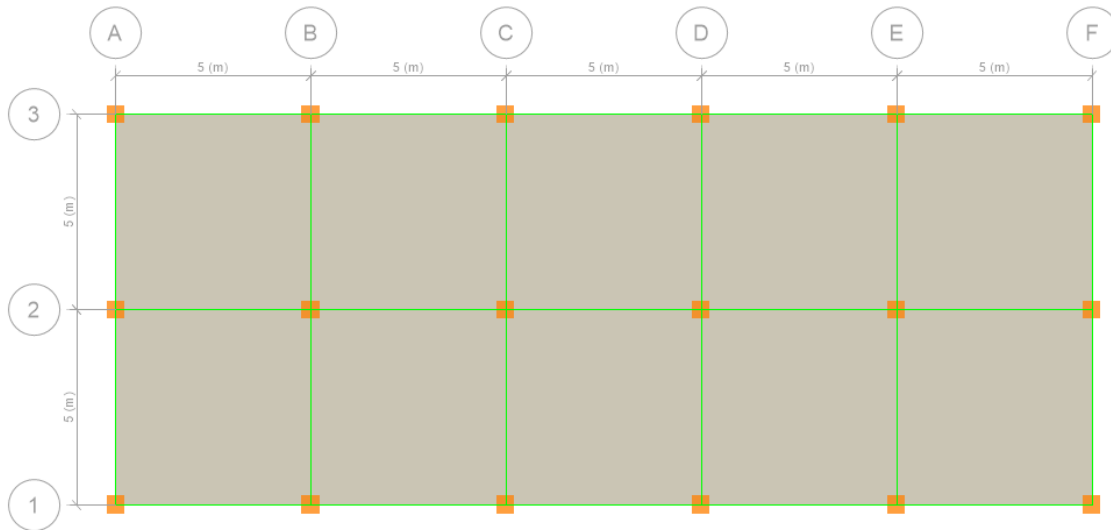


Figura 4.2.- Ejes principales "Etabs 2015".

4.2. Espectro de diseño

El espectro de diseño se construye a partir de las especificaciones determinadas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-15, de acuerdo al capítulo de Peligro Sísmico se establece la zona sísmica V para la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas con un factor sísmico de 0.4 de la aceleración de la gravedad caracterizando a la zona con alta peligrosidad sísmica. De acuerdo con la geología local se ha clasificado el perfil de suelo como tipo D.

Parámetros			
Descripción	Símbolo	Valor	NEC-15 Peligro Sísmico
Coeficiente de amplificación de suelo en zona de periodo corto	Fa	1.2	3.2.2 Tabla 3
Amplificación de las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca	Fd	1.19	3.2.2 Tabla 4
Comportamiento no lineal de los suelos	Fs	1.28	3.2.2 Tabla 5

Razón entre aceleración espectral y PGA para periodo de retorno	η	1.8	3.3.1
Factor según ubicación geográfica	r	1	3.3.1

Tabla 4-1 Parámetros para el espectro de diseño.

Con las especificaciones técnicas y parámetros de la zona se construye el espectro de diseño como valor fraccionario de la gravedad, caracterizando la gráfica por tres zonas de período: período inicial, período crítico y período máximo.

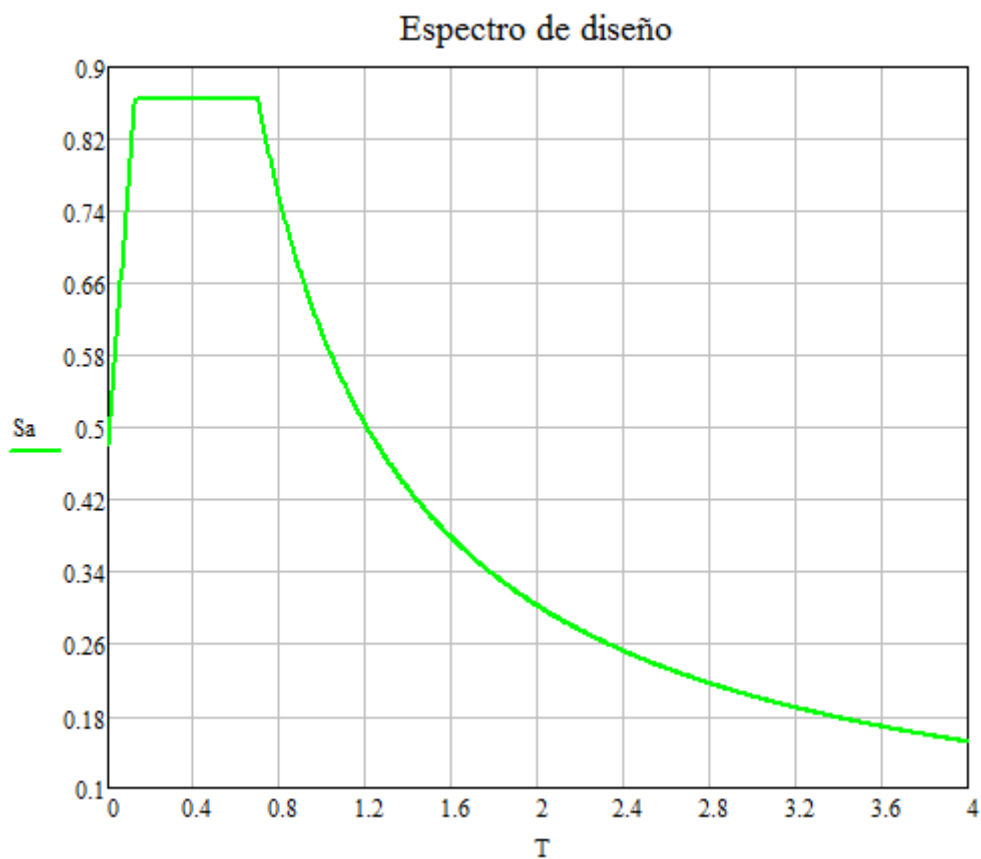


Figura 4.3.- Espectro de Diseño

4.3. Cargas y combinaciones de cargas

Cargas:

- D = Carga muerta
- L = Carga viva
- Lr = Carga viva de cubierta

- E = Carga Sísmica

Combinaciones de Carga

- $U = 1.4D$
- $U = 1.2D + 1.6L + 0.5Lr$
- $U = 1.2D + E + L$
- $U = 0.9D + E$

Para las combinaciones en las cuales la carga sísmica actúa, considerar para cada una de ellas su acción en los dos ejes principales de la estructura por separado más un 30% de la misma carga en sentido ortogonal.

4.4. Método de diseño

Como método de diseño se optó por el diseño basado en fuerzas (DBF) comprobando la capacidad de disipación de energía por deformaciones inelásticas de los elementos estructurales, asegurando daños en los elementos no estructurales y estructurales para sismos significativos y evitando el colapso frente a sismos de gran magnitud. De acuerdo con las especificaciones de la NEC-15 Tabla 6 del capítulo de Peligro sísmico se clasifica a la estructura dentro del rango: otras estructuras con un coeficiente de importancia $I=1$.

4.4.1. Configuración estructural

La estructura cuenta con una configuración regular en planta y en elevación.

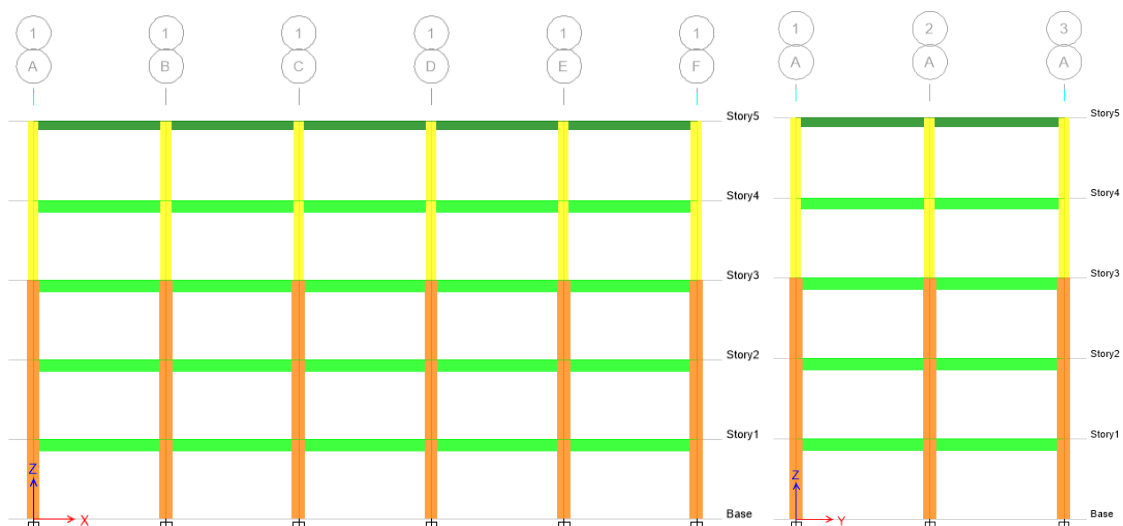


Figura 4.4.- Configuración de elevación "Etabs 2015".

Regularidad/Configuración Estructural		
Coeficiente de regularidad en elevación	ϕ_E	1
Coeficiente de regularidad en planta	ϕ_P	1

Tabla 4-2 Regularidad estructural.

4.4.2. Cortante basal

Se realizó el análisis dinámico (modal espectral) de la estructura gracias al software ETABS, con la cual se obtuvo un cortante basal dinámico que debe de ser al menos mayor al 80% del cortante basal estático que recibe la estructura en una sola dirección a nivel de carga última dado por la NEC-15.

$$V = \frac{I S_a}{R \phi_P \phi_E} W$$

S_a es valor de la aceleración del espectro de respuesta para el modo de vibración aproximado obtenido por el método 1:

$$T_a = C_t h_n^\alpha$$

Donde el periodo aproximado está en función de la altura total de la edificación, los valores de C_t y α se obtienen de la tabla Tipo de estructura de la sección 6.3.3 de la NEC-15 Peligro Sísmico, debiendo cumplir que el periodo aproximado obtenido por la norma y el periodo fundamental obtenido por el análisis dinámico (modal espectral) no varíen en más de un 30%.

Método 1			
Coef. Tipo de estructura	C_t	0.055	adim
Coef. Tipo de estructura	α	0.9	adim
Altura máxima	h_n	15	m
Periodo aproximado	T_a	0.629	seg
Periodo modal espectral	T	0.81	seg

Tabla 4-3 Periodo aproximado por método 1. (NEC 2015).



La carga sísmica reactiva W se toma igual a la carga muerta total, en casos especiales como son espacios dedicados al almacenamiento esta carga se toma la carga muerta más un 25% de la carga viva del espacio ocupado para dicho uso. En el caso de estudio el cortante dinámico no excedía el 80% del cortante estático, por lo cual se procedió a escalar el sismo de diseño por un factor de 1.20.

<i>Cortante Basal</i>		
Análisis Modal Espectral (ETABS)		
Cortante basal X	96540	kgf
Cortante basal Y	88916	kgf
Análisis Estático (NEC-15)		
Cortante basal	103854	kgf
Cortante basal 80%	83083	kgf
Análisis Estático (ETABS)		
Cortante basal X	104066	kgf
Cortante basal Y	104317	kgf

Tabla 4-4 Cortante basal.

4.5. Periodos de vibración

Para el análisis modal espectral se dispuso de una cantidad de 3 modos por piso dando un total de 15 modos para el análisis completo de la estructura, obteniendo 0.810 s como periodo fundamental de la estructura, de igual manera se obtuvo que en el modo 5 existe una participación de masa mayor al 90% en los ejes principales de la edificación. El resumen completo de los resultados se presenta en la siguiente tabla.

Modo	Periodo (seg)	Frecuencia (rad/seg)	Participación de masa X	Participación de masa Y
1	0.810	7.756	0	0.811
2	0.749	8.386	0.820	0.811
3	0.701	8.965	0.820	0.811
4	0.269	23.325	0.820	0.917
5	0.252	24.963	0.922	0.917



6	0.234	26.835	0.922	0.917
7	0.149	42.166	0.922	0.967
8	0.143	43.927	0.969	0.967
9	0.132	47.683	0.969	0.967
10	0.095	66.246	0.969	0.992
11	0.093	67.577	0.993	0.992
12	0.085	73.981	0.993	0.992
13	0.071	88.289	0.993	1
14	0.071	88.975	1	1
15	0.064	98.014	1	1

Tabla 4-5 Períodos de vibración.

4.6. Derivas de piso

Las derivas de piso fueron calculadas y verificadas según lo indicado en la NEC-15 Peligro Sísmico, para el cálculo se ha tomado la inercia agrietada de los elementos estructurales de hormigón debido a que frente a un evento sísmico estas se verán afectadas en su sección por presencia de grietas, siendo un porcentaje de la inercia bruta de la sección específica:

$$I_{gV} = 0.5I_{bV}$$

$$I_{gC} = 0.8I_{bC}$$

El valor máximo permitido para deriva de piso en las estructuras es de 0.02 con respecto a la relación de altura de piso para elementos de hormigón armado, la Norma Ecuatoriana de la Construcción establece que la deriva inelástica de cada piso se debe calcular de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\Delta_M = 0.75R\Delta_E$$

Siendo Δ_E el valor de la deriva elástica de piso debido a la acción de las fuerzas laterales.

Derivas					
Piso	Altura piso (m)	Desp. Max X (mm)	Desp. Max Y (mm)	Deriva Piso X	Deriva Piso Y
1	3	4.0082	4.0921	0.0080	0.0082
2	3	9.9637	10.4662	0.0119	0.0127
3	3	15.2639	16.2636	0.0106	0.0116
4	3	19.2224	20.6972	0.0079	0.0089
5	3	22.3036	24.2534	0.0062	0.0071

Tabla 4-6 Derivas de piso.

De igual manera en el cálculo estructural se incluyen los efectos de segundo orden llamados efectos P-Delta, los cuales incrementan las fuerzas en los elementos estructurales que encadena a un aumento en las solicitaciones de los elementos al igual que mayores desplazamientos. Se calcularon las derivas de piso incluyendo el Efecto P-Delta en el programa computacional ETABS y siguiendo el reglamento de la NEC-15, cumpliendo en cada piso con el límite de deriva inelástica máxima.

Derivas incluyendo Efecto P-Delta					
Piso	Altura piso (m)	Desp. Max X (mm)	Desp. Max Y (mm)	Deriva Piso X	Deriva Piso Y
1	3	4.0428	4.1338	0.0081	0.0083
2	3	10.0416	10.5638	0.0120	0.0129
3	3	15.3718	16.4019	0.0107	0.0117
4	3	19.3467	20.8591	0.0079	0.0089
5	3	22.4367	24.4293	0.0062	0.0071

Tabla 4-7 Derivas de piso con efecto P-Delta.

Para el cálculo de las derivas de piso incluyendo el efecto P-Delta según la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015, primero se debe de garantizar que el índice de estabilidad de cada piso (Q_i) sea menor que 0.3 para clasificarlo como estructura estable.

$$Q_i = \frac{P_i \Delta_i}{V_i h_i}$$



Si el índice es mayor que 0.1 se deben de considerar los efectos P-Delta a la hora de calcular las derivas de piso, multiplicando la deriva de piso por el factor de mayoración $f_{P-\Delta}$.

$$f_{P-\Delta} = \frac{1}{1 - Q_i}$$

Distribución vertical de fuerzas sísmicas laterales							
Piso	Altura (m)	W por piso (kgf)	W en cada piso (kgf)	Vx cada piso (kgf)	Vx en piso (kgf)	Vy cada piso (kgf)	Vy en piso (kgf)
1	3	961612.90	199392.60	6101.28	103854.00	6101.28	103854.00
2	6	762220.30	199392.60	13586.59	97752.72	13586.59	97752.72
3	9	562827.70	199392.60	21701.81	84166.13	21701.81	84166.13
4	12	363435.10	199392.60	30255.21	62464.32	30255.21	62464.32
5	15	164042.50	164042.50	32209.10	32209.10	32209.10	32209.10

Tabla 4-8 Distribución de fuerzas laterales.

Derivas incluyendo Efecto P-Delta									
Piso	Cortante X (kgf)	Cortante Y (kgf)	Carga (kgf)	Qx	Qy	fx	fy	Deriva x	Deriva y
1	103854.00	103854.00	1179112.90	0.0910	0.0929	1.00	1.00	0.0080	0.0082
2	97752.72	97752.72	929720.30	0.1133	0.1212	1.13	1.14	0.0134	0.0145
3	84166.13	84166.13	680327.70	0.0857	0.0937	1.00	1.00	0.0106	0.0116
4	62464.32	62464.32	430935.10	0.0546	0.0612	1.00	1.00	0.0079	0.0089
5	32209.10	32209.10	181542.50	0.0347	0.0401	1.00	1.00	0.0062	0.0071

Tabla 4-9 Derivas de piso con efecto P-Delta.



4.7. Diseño de los elementos estructurales

Los elementos estructurales se diseñaron según las especificaciones del ACI-318-14 capítulo 18 de Estructuras Sismo Resistentes, el diseño de los elementos estructurales se lo realiza de modo que la resistencia disminuida por los factores de reducción sea mayor a la solicitación última.

$$\phi M_n \geq M_u$$

$$\phi V_n \geq V_u$$

$$\phi T_n \geq T_u$$

$$\phi P_n \geq P_u$$

Factores de reducción de resistencia		
Momento y/o Fuerza axial	0.9	adim
Cortante	0.75	adim
Torsión	0.75	adim

Tabla 4-10 Factores de reducción de resistencia.

Teniendo en cuenta el principio fundamental a la hora de diseño de “columna fuerte - viga débil” se ha garantizado que la resistencia de los elementos tipo columna al menos estén un 20% sobre la resistencia de los elementos tipo viga, asegurando el diseño de las rotulas plásticas en las vigas obteniendo de esta manera un control sobre la localización del daño en la estructura frente a un evento sísmico.

Las características de los materiales empleados en el diseño de los elementos estructurales son los siguientes:

Especificaciones			
Resistencia del hormigón	f'c	240	kg/cm ²
Densidad del hormigón	δ	2400	kg/m ³
Resistencia del refuerzo longitudinal	fy	4200	kg/cm ²
Resistencia del refuerzo transversal	fyt	4200	kg/cm ²

Tabla 4-11 Especificaciones técnicas de los materiales.



A. Diseño de las vigas de entrepisos

Para el diseño de los elementos estructurales tipo viga situados en los entrepisos en ambos ejes de la estructura se ha tomado una sección rectangular de 30x55 cm con un recubrimiento de 5cm para los refuerzos de acero, las solicitaciones últimas para el diseño de la sección son:

Vigas Entrepiso			
Pu (Kgf)	Vu (Kgf)	Tu (Kgf-m)	Mu (Kgf-m)
477.09	9571.79	81.14	6772.92
-359.49	-9571.79	-81.14	-12961.37

Tabla 4-12 Solicitaciones.

Según las condiciones de apoyo y la luz de la viga se calcula un peralte mínimo para la viga según ACI-318-14 Tabla 9.3.11 resultando de 24cm por lo cual se cumple satisfactoriamente con el peralte de diseño, de acuerdo con las especificaciones de los materiales y la sección del elemento estructural se calculan los límites de refuerzo longitudinal de las vigas de entrepiso de acuerdo con ACI-318-14 18.6.3.1

ÁREA DE ACERO MÍNIMA	Asmin	4.80	cm ²
ÁREA DE ACERO MÁXIMA	Asmax	41.25	cm ²

Tabla 4-13 Área de acero.

Con los límites establecidos se calcula el refuerzo necesario en la parte superior e inferior de la viga de entrepiso de acuerdo con las solicitaciones específicas de modo de que la capacidad del elemento sea mayor o igual a la solicitación última, al tener la viga un peralte de 55 cm se colocará un refuerzo extra en la mitad de la viga.

- **Diseño a flexión**
 - **Refuerzo superior**

MOMENTO NOMINAL	Mn	1440152.22	kg.cm
NÚMERO DE VARILLAS A FLEXIÓN	n	3	adim
φ REFUERZO LONGITUDINAL	φ	20	mm



ÁREA DE VARILLAS A FLEXIÓN	As	9.42	cm ²
CUANTÍA	ρ	0.0057	adim
MOMENTO NOMINAL DE LA VIGA	Mn	1644006.09	kg.cm
PORCENTAJE DE EXCEDENCIA	%	14.16	%

Tabla 4-14 Cálculo de refuerzo superior.

- **Refuerzo inferior**

MOMENTO NOMINAL	Mn	1106320.00	kg.cm
NÚMERO DE VARILLAS A FLEXIÓN	n	2	adim
ϕ REFUERZO LONGITUDINAL	ϕ	20	mm
ÁREA DE VARILLAS A FLEXIÓN	As	6.28	cm ²
CUANTÍA	ρ	0.0038	adim
MOMENTO NOMINAL DE LA VIGA	Mn	1152899.42	kg.cm
PORCENTAJE DE EXCEDENCIA	%	4.21	%

Tabla 4-15 Cálculo de refuerzo inferior.

- **Longitud de desarrollo gancho de 90**

FACTOR POR CONCRETO LIVIANO	λ	1	adim
FACTOR POR EPÓXICO	ψ_e	1	adim
FACTOR POR RECUBRIMIENTO	ψ_c	1	adim
FACTOR POR CONFINAMIENTO DEL REFUERZO	ψ_r	1	adim
LONGITUD DE DESARROLLO	l_{dh}	40.67	cm
PARTE RECTA DEL GANCHO	l_{rec}	24	cm

Tabla 4-16 Cálculo de longitud de desarrollo.

• **Diseño a cortante**

- **Rótulas plásticas**

LONGITUD DE ZONAS A LAS DOS CARAS DE COLUMNAS	ℓ_z	96	cm
ESPACIAMIENTO MÁXIMO	s	12	cm
ESPACIAMIENTO	s	12	cm
NÚMERO DE RAMALES	R	2	adim
ϕ REFUERZO LONGITUDINAL TRANSVERSAL	ϕ	10	mm
ÁREA DE ESTRIBOS	Av	1.57	cm ²
ÁREA DE REFUERZO POR METRO	Av/m	0.001309	m ² /m
CORTANTE DEL ACERO	Vs	26389.38	kg
PORCENTAJE DE EXCEDENCIA	%	44.85	%

Tabla 4-17 Cálculo de refuerzo transversal en rótulas plásticas.



- **Zonas normales**

LONGITUD DE ZONAS NORMALES	ℓ_z	2.63	m
CONSIDERAR CONTRIBUCIÓN DE HORMIGÓN	V_c	No	adim
ESPACIAMIENTO MÁXIMO	s	15	cm
ESPACIAMIENTO	s	15	cm
NÚMERO DE RAMALES	R	2	adim
ϕ REFUERZO LONGITUDINAL TRANSVERSAL	ϕ	10	mm
ÁREA DE ESTRIBOS	A_v	1.57	cm ²
ÁREA DE REFUERZO POR METRO	A_v/m	0.001047	m ² /m
CORTANTE DEL ACERO	V_s	21111.50	kg
PORCENTAJE DE EXCEDENCIA	%	15.88	%

Tabla 4-18 Cálculo de refuerzo transversal en vano.

• **Diseño a torsión**

- **Torsión**

TORSIÓN ÚLTIMA	T_u	8114	kg.cm
TORSIÓN DE AGRIETAMIENTO	T_{cr}	272908.63	kg.cm
LÍMITE PARA EL DISEÑO A TORSIÓN	$\phi T_{cr}/4$	51645.69	kg.cm
CONSIDERACIÓN DE TORSIÓN		NO DISEÑO TORSIÓN	

Tabla 4-19 Cálculo de torsión.

B. Diseño de las vigas de cubierta

Para el diseño de los elementos estructurales de cubierta en ambos ejes se ha tomado una sección rectangular de 25x35 cm con un recubrimiento de 5cm para los refuerzos de acero, las solicitaciones últimas para el diseño de la sección son:

Vigas Cubierta			
Pu (Kgf)	Vu (Kgf)	Tu (Kgf-m)	Mu (Kgf-m)
121.04	4619.02	39.65	2895.99
-502.15	-4619.02	-39.65	-4304.5

Tabla 4-20 Solicitaciones.



Según las condiciones de apoyo y la luz de la viga se calcula un peralte mínimo para la viga según ACI-318-14 Tabla 9.3.11 resultando de 24cm por lo cual se cumple satisfactoriamente con el peralte de diseño, de acuerdo con las especificaciones de los materiales y la sección del elemento estructural se calculan los límites de refuerzo longitudinal de las vigas de entrepiso de acuerdo con ACI-318-14 18.6.3.1

ÁREA DE ACERO MÍNIMA	Asmin	2.33	cm ²
ÁREA DE ACERO MÁXIMA	Asmax	21.875	cm ²

Tabla 4-21 Área de acero.

Con los límites establecidos se calcula el refuerzo necesario en la parte superior e inferior de la viga de entrepiso de acuerdo con las solicitaciones específicas de modo de que la capacidad del elemento sea mayor o igual a la solicitación última.

- **Diseño a flexión**

- **Refuerzo superior**

MOMENTO NOMINAL	Mn	478277.78	kg.cm
NÚMERO DE VARILLAS A FLEXIÓN	n	2	adim
φ REFUERZO LONGITUDINAL	φ	18	mm
ÁREA DE VARILLAS A FLEXIÓN	As	5.09	cm ²
CUANTÍA	ρ	0.0058	adim
MOMENTO NOMINAL DE LA VIGA	Mn	508921.38	kg.cm
PORCENTAJE DE EXCEDENCIA	%	6.41	%

Tabla 4-22 Cálculo de refuerzo superior.

- **Refuerzo inferior**

MOMENTO NOMINAL	Mn	321776.67	kg.cm
NÚMERO DE VARILLAS A FLEXIÓN	n	2	adim
φ REFUERZO LONGITUDINAL	φ	14	mm
ÁREA DE VARILLAS A FLEXIÓN	As	3.08	cm ²
CUANTÍA	ρ	0.0035	adim
MOMENTO NOMINAL DE LA VIGA	Mn	329276.88	kg.cm
PORCENTAJE DE EXCEDENCIA	%	2.33	%

Tabla 4-23 Cálculo de refuerzo inferior.

- **Longitud de desarrollo gancho de 90**

FACTOR POR CONCRETO LIVIANO	λ	1	adim
FACTOR POR EPÓXICO	ψ_e	1	adim
FACTOR POR RECUBRIMIENTO	ψ_c	1	adim
FACTOR POR CONFINAMIENTO DEL REFUERZO	ψ_r	1	adim
LONGITUD DE DESARROLLO	l_{dh}	36.60	cm
PARTE RECTA DEL GANCHO	l_{rec}	21.6	cm

Tabla 4-24 Cálculo de longitud de desarrollo.

• **Diseño a cortante**

- **Rotulas plásticas**

LONGITUD DE ZONAS A LAS DOS CARAS DE COLUMNAS	ℓ_z	56	cm
ESPACIAMIENTO MÁXIMO	s	7	cm
ESPACIAMIENTO	s	7	cm
NÚMERO DE RAMALES	R	2	adim
ϕ REFUERZO LONGITUDINAL TRANSVERSAL	ϕ	10	mm
ÁREA DE ESTRIBOS	A_v	1.57	cm ²
ÁREA DE REFUERZO POR METRO	A_v/m	0.002244	m ² /m
CORTANTE DEL ACERO	V_s	26389.38	gk
PORCENTAJE DE EXCEDENCIA	%	166.19	%

Tabla 4-25 Cálculo de refuerzo transversal en rótulas plásticas.

- **Zonas normales**

LONGITUD DE ZONAS NORMALES	ℓ_z	3.43	m
CONSIDERAR CONTRIBUCIÓN DE HORMIGÓN	V_c	No	adim
ESPACIAMIENTO MÁXIMO	s	14	cm
ESPACIAMIENTO	s	14	cm
NÚMERO DE RAMALES	R	2	adim
ϕ REFUERZO LONGITUDINAL TRANSVERSAL	ϕ	10	mm
ÁREA DE ESTRIBOS	A_v	1.57	cm ²
ÁREA DE REFUERZO POR METRO	A_v/m	0.001122	m ² /m
CORTANTE DEL ACERO	V_s	13194.69	kg
PORCENTAJE DE EXCEDENCIA	%	33.10	%

Tabla 4-26 Cálculo de refuerzo transversal en vano.



- **Diseño a torsión**

- **Torsión**

TORSIÓN ÚLTIMA	T_U	3965	kg.cm
TORSIÓN DE AGRIETAMIENTO	T_{cr}	108725.94	kg.cm
LIMITE PARA EL DISEÑO A TORSIÓN	$\phi T_{cr}/4$	20760.27	kg.cm
CONSIDERACIÓN DE TORSIÓN		NO DISEÑO TORSIÓN	

Tabla 4-27 Cálculo de torsión.

C. Diseño de Columnas

El dimensionamiento de estos elementos debe ser tal que su capacidad cumpla con la demanda requerida, así como también se debe tener en cuenta la longitud de desarrollo y anclaje de los elementos vigas que llegan a estos.

DATOS	
b (cm) propuesto	45
h (cm) propuesto	45
Recubrimiento (cm)	4
Luz Libre (m)	2.45
Altura de la Viga (m)	0.55
f'_c (kg/cm ²)	240
F_y (kg/cm ²)	4200
F_u (kg/cm ²)	5250
E_s (kg/cm ²)	2100000
Factor Sección Agrietada	0.8
ϕ (Cortante)	0.75
P_u (Envolvente) kg	139118.37
M (Envolvente) kg*cm	1357754
V_u (Envolvente) kg	7744.73

Tabla 4-28 Datos para diseño de columnas (pisos 1-2-3).



DATOS	
b (cm) propuesto	40
h (cm) propuesto	40
Recubrimiento (cm)	4
Luz Libre (m)	2.45
Altura de la Viga (m)	0.55
f_c (kg/cm ²)	240
F_y (kg/cm ²)	4200
F_u (kg/cm ²)	5250
E_s (kg/cm ²)	2100000
Factor Sección Agrietada	0.8
ϕ (Cortante)	0.75
P_u (Envolvente) kg	49442.18
M (Envolvente) kg*cm	643639
V_u (Envolvente) kg	4638.8

Tabla 4-29 Datos para diseño de columnas (pisos 4-5).

- **Diseño a flexo-compresión:**

Cumpliendo con los límites de cuantía (1-6 %), recubrimiento y espaciamiento para un elemento columna establecidos en la NEC se procede a establecer la cantidad de acero con el objetivo de que a curva de interacción englobe al punto de demanda.

	#	ϕ (mm)	A_l (cm ²)	Intervalo de Cuantía (0.01-0.06)
Armadura Longitudinal	12	20	37.70	0.019

Tabla 4-30 Armadura de flexión (pisos 1-2-3).

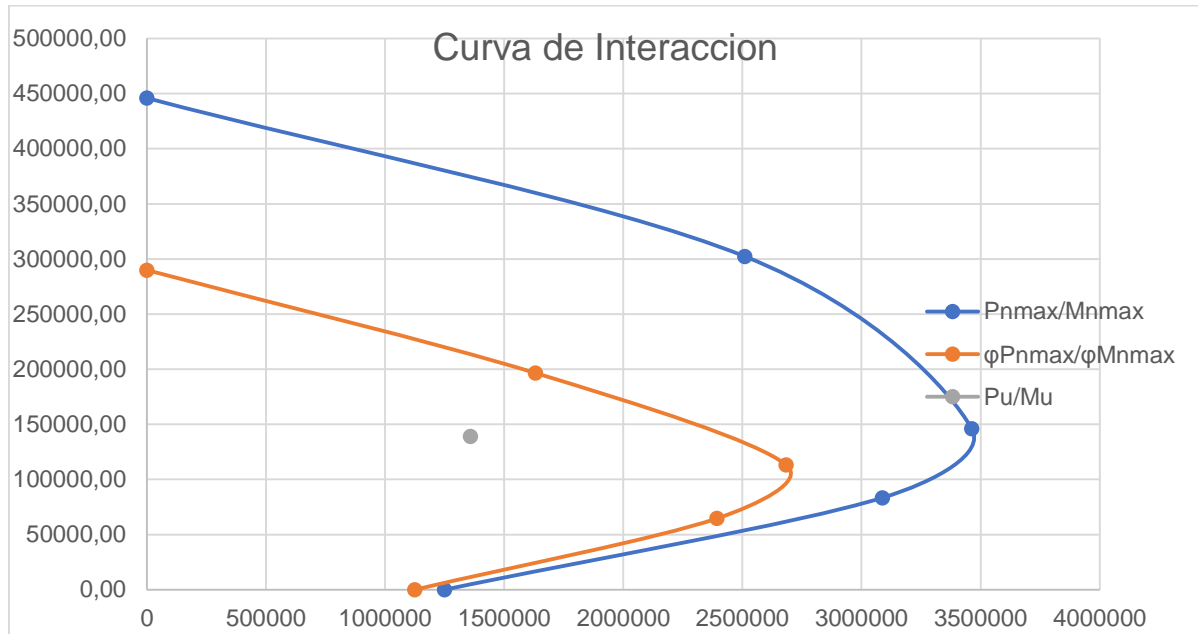


Figura 4.5 Diagrama de Interacción para columna de pisos 1-3.

	#	φ (mm)	Al (cm ²)	Intervalo de Cuantía (0.01-0.06)
Armadura Longitudinal	8	18	20.358	0.013

Tabla 4-31 Armadura de flexión (pisos 4-5).

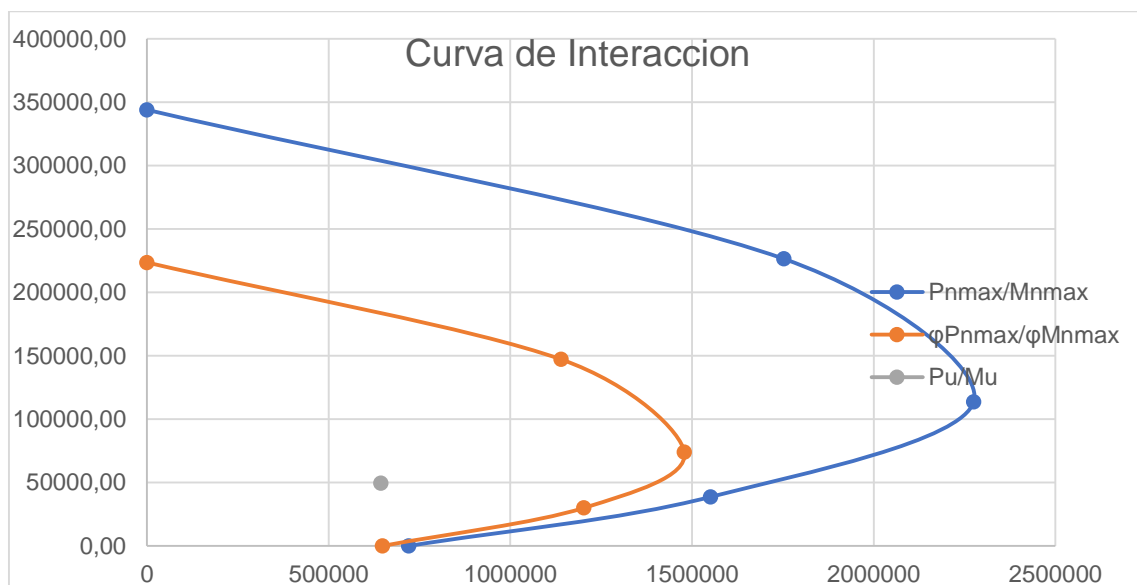


Figura 4.6 Diagrama de Interacción para columna de pisos 4-5.



- Diseño a Cortante:

Cumpliendo con el área mínima de estribo y su espaciamiento establecido en la norma, se debe verificar que el cortante demandante y el máximo probable sean menores que la capacidad del elemento.

	#ramales	ϕ (mm)	A varilla (cm ²)	s (cm) máx	s (cm) adoptada
Refuerzo Transversal	2	10	0.79	11.3	10

Tabla 4-32 Armadura transversal (pisos 1-2-3).

	#	ϕ (mm)	A varilla (cm ²)	s (cm) máx	s (cm) adoptada
Refuerzo Transversal	2	10	0.79	10.0	10

Tabla 4-33 Armadura transversal (pisos 4-5).

5. Diseño y modelamiento del sistema de aislación

En este capítulo se dimensiona los aisladores que conforman el sistema de aislamiento estableciendo un periodo de elongación objetivo al que se desea alcanzar en la estructura del capítulo anterior. Se realiza ciertos procesos para establecer la correcta modelación de los elementos que componen el sistema de aislamiento mediante la herramienta computacional “Etabs 2015”. Finalmente se modela el sistema de aislación con la estructura para un análisis de resultados y modificaciones respectivas.

5.1. Especificaciones estructurales

El diseño del sistema de aislación se realiza para la estructura propuesta en el capítulo anterior con una configuración presentada en la figura 5.1 y figura 5.2

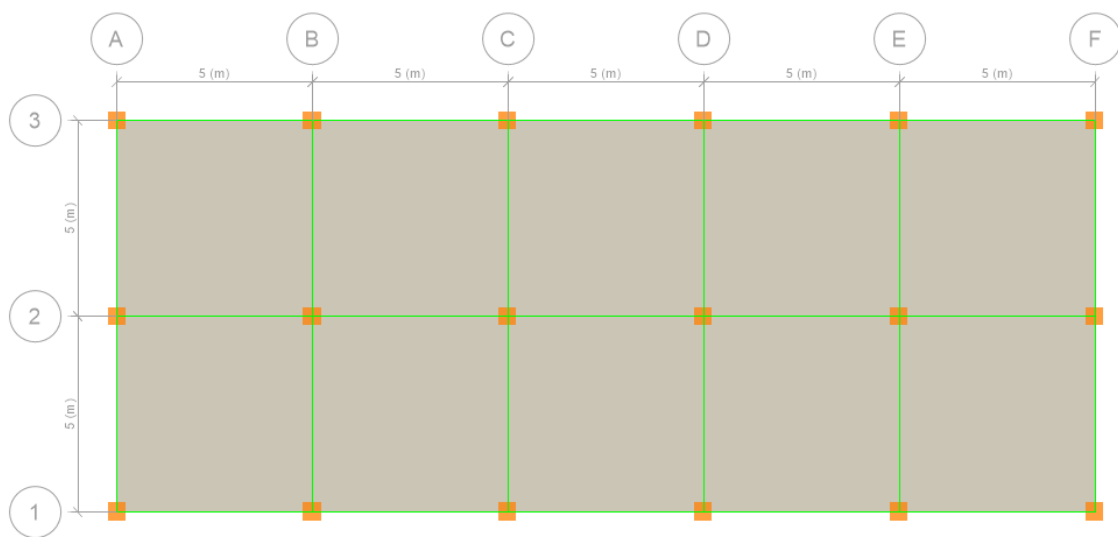


Figura 5.1.- Configuración en planta “Etabs 2015”.

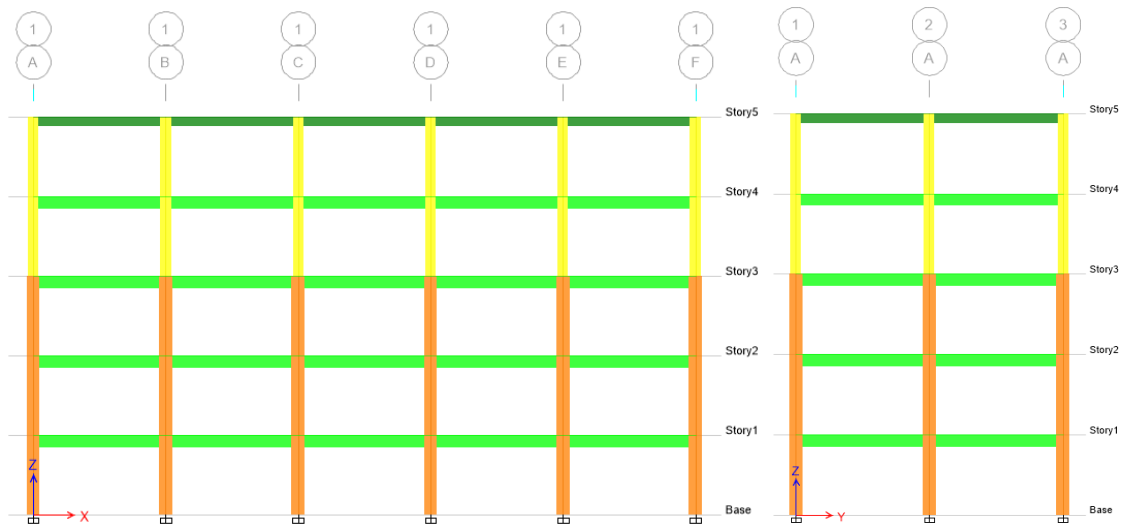


Figura 5.2.- Configuración de elevación "Etabs 2015".

Del modelo estructural en condiciones de base empotrada se obtuvieron los valores de fuerzas permanentes que se transmite de la estructura a la cimentación.

Carga Sísmica Reactiva [Kg]						
Ejes	A	B	C	D	E	F
1	30653.65	50086.91	50079.02	50079.02	50086.91	30653.65
2	50082.54	84506.16	84578.57	84578.57	84506.16	50082.54
3	30653.65	50086.91	50079.02	50079.02	50086.91	30653.65
						961612.86

Tabla 5.1 Fuerzas que se transmiten al sistema de aislación.

Para el diseño del sistema de aislación se optará por una configuración mixta entre aisladores elastoméricos (NRB) y aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB), con un número de aportación de 12 y 6 unidades respectivamente.

Los parámetros de aceleración S1 (Aceleración a 1 segundo) y de sitio (de periodo largo) Fv fueron obtenidos en base a la construcción del espectro de diseño de la ASCE 7-10 Capítulo 11 equivalente al espectro de diseño de la Norma Ecuatoriana de la construcción (NEC 2015). El coeficiente de suelo de periodo largo (F_v) se obtuvo de acuerdo a la Tabla 11.4-2 del ASCE 7-10 en base al valor del parámetro de aceleración y el tipo de suelo clasificado en el capítulo de diseño tradicional como tipo D.

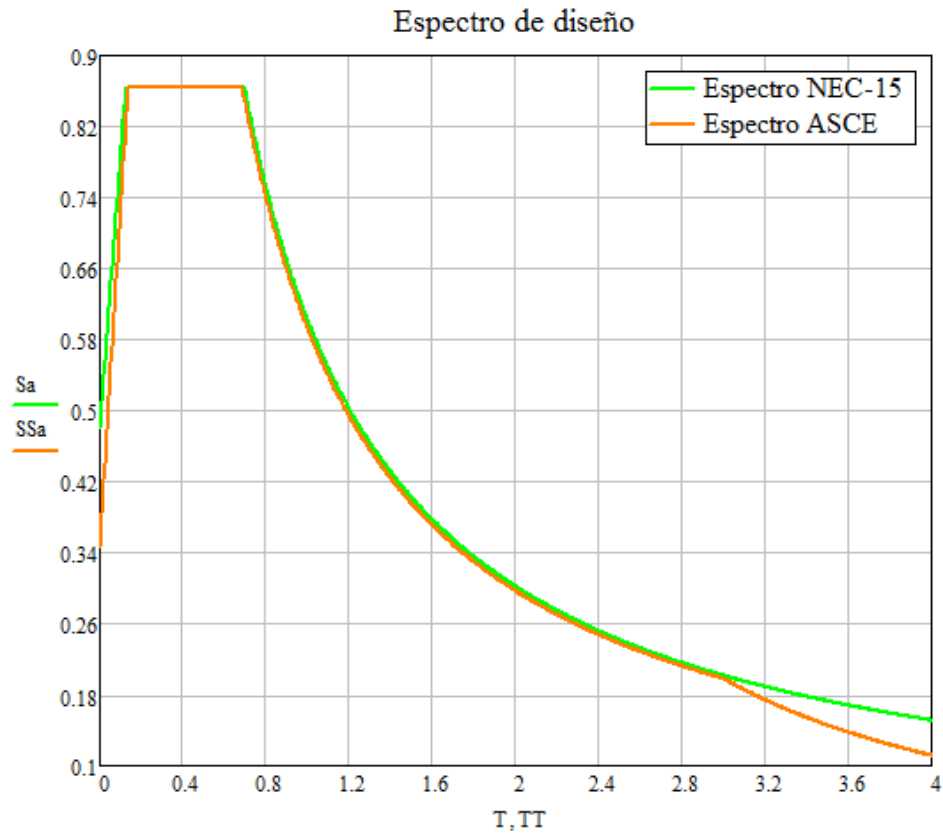


Figura 5.3.- Espectro de diseño (NEC y ASCE).

Parámetros			
Parámetro de aceleración	S1	0.493	adim
Parámetro de sitio	Fv	1.805	s
Parámetro de diseño del espectro de aceleración	SM1	0.89	s
Parámetro del espectro de aceleración del MEC	SD1	0.593	s

Tabla 5.2.- Parámetros iniciales.

5.2. Diseño del sistema de aislación

Para la estructura planteada se establece un periodo y amortiguamiento objetivo el cual se pretende llegar gracias al diseño del sistema de aislación.

Características objetivas			
Periodo objetivo	T	2	s
Amortiguamiento objetivo	β	20	%

Tabla 5.3.- Características objetivas.

Se calcula el valor del desplazamiento de diseño.

$$D_d = \frac{g * S_{D1} * T}{4 * \pi^2 B_D} = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} * 0.593s * 2s}{4 * \pi^2 * 1.5} = 194.65 \text{ mm}$$

Cálculo de la rigidez efectiva del sistema de aislación.

$$k_{eff} = M * \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = 961612.86kg * \left(\frac{2\pi}{2s} \right)^2 = 9490738.515 \frac{N}{m}$$

Cálculo de la energía de disipación por ciclo de histéresis

$$W_D = 2 * \pi * k_{eff} * \beta_D * D_d^2 =$$

$$2 * \pi * 9484761.25 \frac{N}{m} * 1.5 * (194.65mm)^2 = 449788.43 \text{ J}$$

El cálculo de las características fundamentales del modelo bilineal del sistema de aislación se realiza mediante el proceso iterativo expuesto en el capítulo 4. Obteniendo los valores finales del sistema de aislación (tabla 5.4) y de los aisladores LRB (tabla 5.5) y NRB (tabla 5.6).

Sistema de Aislación		
Período	2	s
Amortiguamiento	19.89	%
Desplazamiento	194.65	mm
Rigidez Efectiva	9490738.51	N/m
Rigidez Elástica	63492454.9	N/m
Rigidez Plástica	6349245.49	N/m
Fuerza de fluencia	677864.35	N
Energía disipada	449788.43	J

Tabla 5.4.- Características del sistema de aislación.

Aisladores LRB		
Diámetro exterior	478.2	mm
Diámetro de plomo	110.9	mm
Altura goma	20	mm
Altura total	357	mm
Rigidez Efectiva	862443.78	N/m
Rigidez Elástica	9863725.86	N/m
Rigidez Plástica	339857.63	N/m
Fuerza de fluencia	105308.07	N

Tabla 5.5.- Características de aisladores LRB.

Aisladores NRB		
Diámetro exterior	478.2	mm
Rigidez Efectiva	359174.98	N/m

Tabla 5.6.- Características de aisladores NRB.

A continuación, se procede a determinar las características geométricas por unidad aisladora dependiendo del número de espécimen de cada clase.

Se calcula el diámetro del núcleo de plomo para los aisladores LRB con un esfuerzo de fluencia f_y de 10.52729 MPa.

$$A_p = \frac{Q}{f_y * n_{LRB}} = \frac{610328.26N}{10.52729 MPa * 6} = 96.587 cm^2$$

$$D_p = 110.9 mm$$

Calculo del área de elastómero requerida por cada unidad de aislamiento indiferente al tipo de aislador, tomando como valor de altura total de goma de 20 cm, con un valor del módulo de corte G_e de 0.4MPa

$$A_e = \frac{t_r}{G_e} k_2 = \frac{20cm}{0.4MPa} * 6349245.49 \frac{N}{m} = 31746.227 cm^2$$



Para el cálculo del diámetro exterior de los aisladores LRB se debe de tomar en cuenta el área de aporte del núcleo de plomo, para el diseño se implanto que los diámetros exteriores de los dos tipos de aisladores fuesen en mismo.

$$A_{NRB} = A_e \rightarrow D_{NRB} = 478.18362mm$$

$$A_{LRB} = A_e + A_p \rightarrow D_{LRB} = 478.18362 mm$$

Se presenta un cuadro de resumen de los resultados del sistema de aislación para lograr los planteamientos objetivos de periodo y amortiguamiento.

Definición	Simbología	valor	unidades
Número de aisladores	n	18	u
Módulo de corte	Ge	0.4	MPa
Altura total de goma	tr	20	cm
Número de aisladores LRB	n _{LRB}	6	u
Diámetro del aislador LRB	D _{LRB}	478.18	mm
Diámetro de plomo del aislador LRB	D _p	110.92	mm
Esfuerzo de fluencia del plomo	fy	10.53	MPa
Desplazamiento de fluencia del plomo	D _y	10.68	mm
Número de aisladores NRB	n _{NRB}	12	u
Diámetro del aislador NRB	D _{NRB}	478.18	mm

Tabla 5.7 Tabla de resumen del diseño del sistema de aislación requerido y geometría calculada.

Con la geometría establecida y con los parámetros mecánicos a satisfacer por el sistema de aislación se comprueba su funcionamiento para el sismo máximo, sabiendo que el máximo desplazamiento que puede alcanzar los aisladores es del 250% de la altura total del elastómero, siendo para las unidades diseñadas de 500mm.

Sismo Máximo Probable		
Desplazamiento Máximo	357.897	mm
Periodo Máximo	2.171	s
Amortiguamiento	13.1	%

Tabla 5.8 Tabla de resumen del sistema de aislación bajo acción del sismo máximo probable.

5.3. **Modelamiento de aisladores y del sistema de aislación (1 Grado de libertad)**

Para realizar el correcto modelamiento de los aisladores en el programa computacional ETABS 2015, se realizó verificaciones individuales y del sistema de aislación obteniendo exitosamente las respuestas deseadas según la teoría presentada anteriormente.

5.3.1. **Modelamiento de aisladores**

Para el modelamiento de los aisladores se utilizó los elementos “link” del tipo “Rubber Isolator” diferenciando para el modelo de los aisladores NRB y LRB la activación de la opción no lineal.

Para la comprobación de la modelación individual de los aisladores se tomó como consideraciones: empotramiento inferior de los aisladores; la utilización de una masa concentrada en la parte superior de los elementos link igual a la carga reactiva utilizada en el diseño del sistema de aislación con el fin de comparar con el proceso teórico; se tomó como nulo el peso de los aisladores. El modelamiento de los aisladores se realizará de igual manera en las direcciones horizontales, considerando en la dirección vertical como empotrado debido a su gran rigidez vertical que presentan las unidades de aislamiento (figura 5.4); el amortiguamiento efectivo se toma como nulo debido a que este se toma del comportamiento histerético del elemento link (Council. 2011).

5.3.1.1. **Modelamiento de aislador NRB**

Al concentrar la masa de 961612.86 kg sobre el aislador NRB modelado con una rigidez horizontal de 359174.98 N/m, según la teoría se espera un periodo de:

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{Masa}{Rigidez}} = 10.2808 s$$

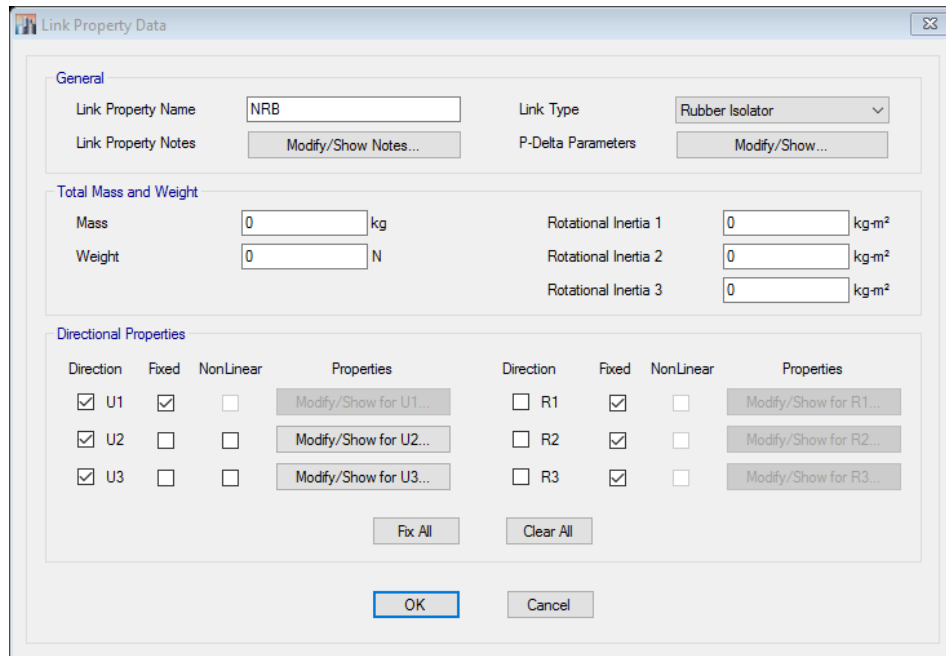


Figura 5.4.- Opciones generales del modelamiento de aislador NRB “Etabs 2015”.

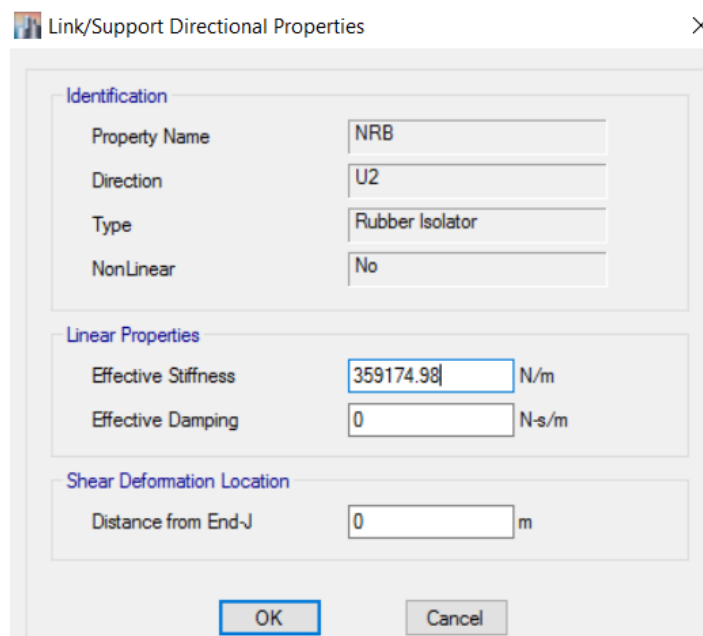


Figura 5.5.- Modelamiento de características principales de aislador NRB “Etabs 2015”.

El resultado obtenido del ETABS 2015 luego del análisis es:

Tabla: Período y Frecuencia				
Caso	Modo	Periodo	Frecuencia	Frecuencia Circular
		sec	cyc/sec	rad/sec
Modal	1	10.2808	0.097	0.6112

Tabla 5.9 Período y frecuencia.

5.3.1.2. Modelamiento de aislador LRB

Se concentra la masa de 961612.86 kg sobre el aislador LRB modelada con rigidez horizontal de 862443.78 N/m, según la teoría se espera un periodo de.

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{Masa}{Rigidez}} = 6.6346 s$$

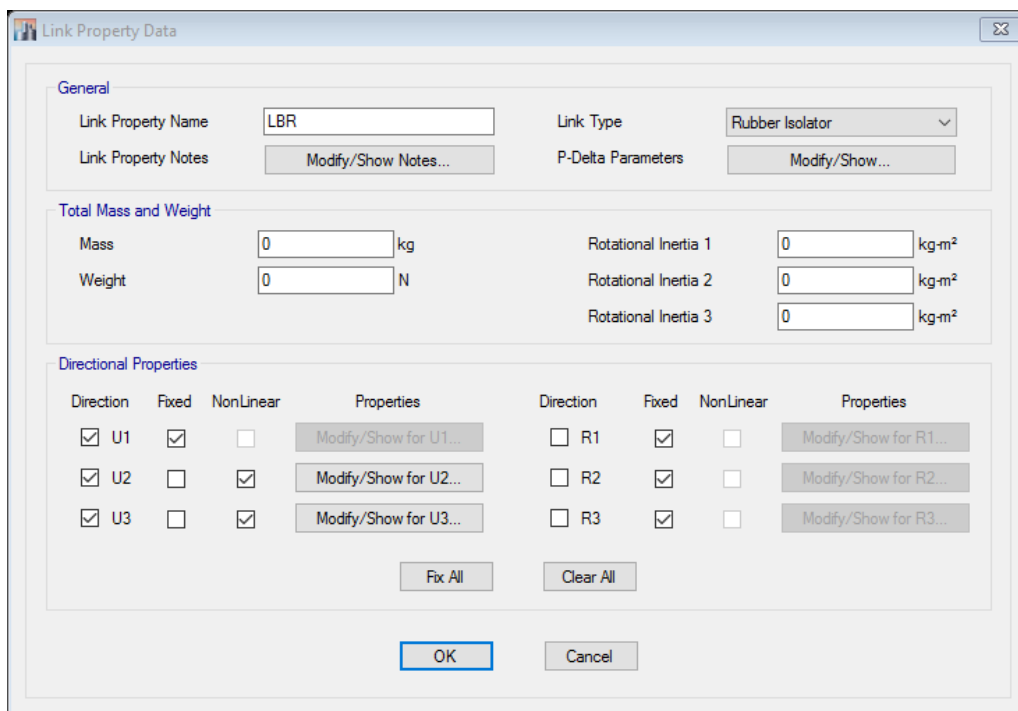


Figura 5.6.- Opciones generales del modelamiento de aislador NRB “Etabs 2015”.

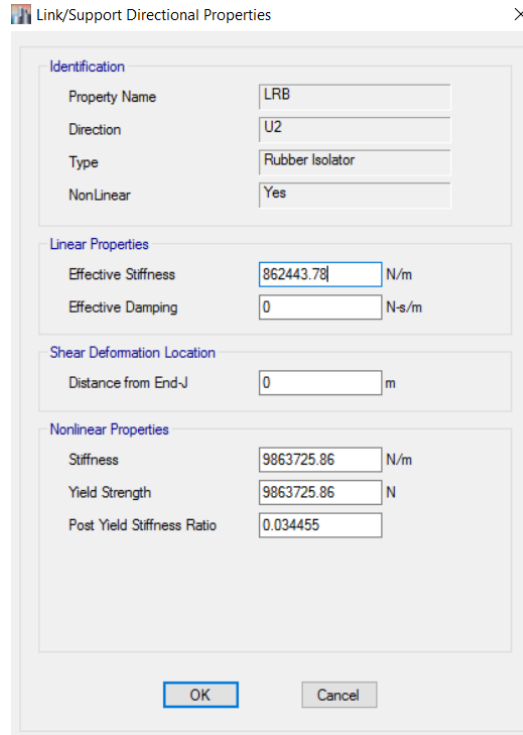


Figura 5.7.- Modelamiento de características principales de aislador LRB “Etabs 2015”.

El resultado obtenido del EABS luego del análisis es:

Tabla: Periodo y Frecuencias				
Caso	Modo	Periodo	Frecuencia	Frecuencia Circular
		sec	cyc/sec	rad/sec
Modal	1	6.6346	0.151	0.947

Tabla 5.10 Período y frecuencia.

5.3.1.3. Modelamiento del sistema de aislación

Se modeló el sistema de aislación con un solo aislador concentrando la masa de 961612.86 kg sobre el elemento link, el cual posee las características mecánicas completas del sistema para verificar el correcto funcionamiento en el campo lineal y no lineal de la modelación

Al concentrar la masa en un solo punto (parte superior del aislador), se establece que la única rigidez que actúa contra los movimientos sísmicos es la rigidez horizontal del sistema de aislación, considerando que la super-estructura se comporta como un cuerpo rígido (rigidez infinita) teóricamente. Se debe tomar en consideración que al momento de modelar la super-estructura completa existirán diferencias entre los valores teóricos y modelados.

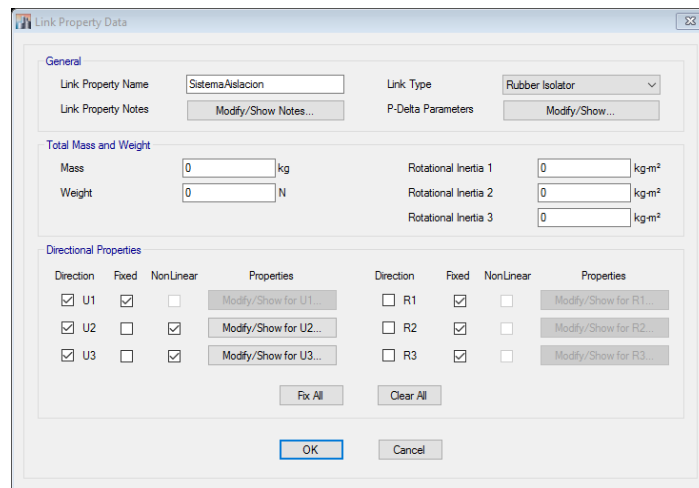


Figura 5.8.- Opciones generales del modelamiento del sistema de aislación “Etabs 2015”.

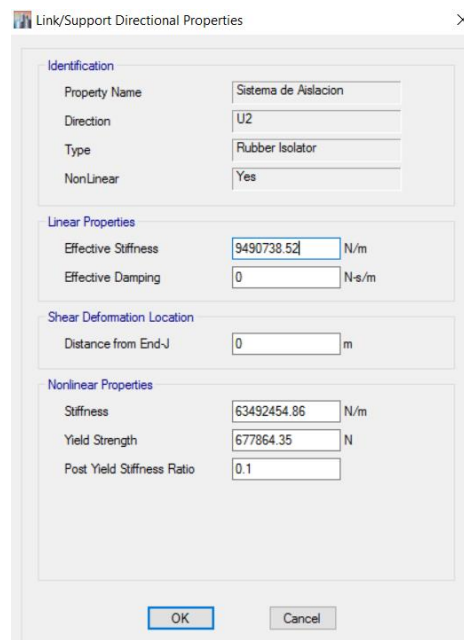


Figura 5.9.- Modelamiento de características principales del sistema de aislación “Etabs 2015”.



Al modelar todo el sistema de aislación con un solo aislador concentrando la masa actuante de la estructura sobre este, se espera el periodo teórico al cual fue diseñado sea de 2s.

El resultado obtenido del ETABS 2015 luego del análisis es:

Tabla: Periodo y Frecuencias				
Caso	Modo	Periodo	Frecuencia	Frecuencia Circular
		sec	cyc/sec	rad/sec
Modal	1	2.0006	0.5	3.1406

Tabla 5.11 Período y frecuencia.

Se observa que el resultado de periodo obtenido por el modelamiento de los aisladores con masa concentrada con respecto al teórico es el mismo, por lo cual, se da la verificación de cumplimiento del periodo por peso actuante y rigidez efectiva.

Se realiza la verificación del modelo del sistema de aislación en el campo lineal, por lo cual de este análisis se espera que la respuesta de desplazamiento vs fuerza sea lineal con una pendiente igual a la rigidez efectiva horizontal.

Análisis Lineal	
Fuerza N	Desplazamiento mm
1841240	194.12
1380930	145.59
920620	97.06
460310	48.43
0	0.00
-460310	-48.43
-920620	-97.06
-1380930	-145.59
-1841240	-194.12

Tabla 5.12 Fuerzas y desplazamientos resultantes del análisis lineal del sistema de aislación.



Figura 5.10.- Gráfica desplazamiento vs fuerza en campo lineal.

Se calcula la rigidez en base a la fuerza y desplazamiento en cualquier punto de la figura 5.10, dicho resultado deberá ser igual a la rigidez efectiva calculada en el diseño del sistema de aislación que es de 9484761.25 N/m.

$$Rigidez = \frac{Fuerza}{Desplazamiento} = 9485060.787 \frac{N}{m}$$

Siendo la diferencia entre la base teórica y el modelamiento en el programa computacional ETABS 2015 de apenas el 0.0032%.

Para la verificación del modelamiento del sistema de aislación en el campo no-lineal se realizó un análisis “Pushover” a través del tiempo, obteniendo como resultado una curva histerética muy próxima a la curva histerética del modelo bilineal teórico con una diferencia entre las curvas de 0.27%, justificado por la razón de que el cálculo teórico contempla un confinamiento del núcleo de plomo perfecto (figura 3.4).

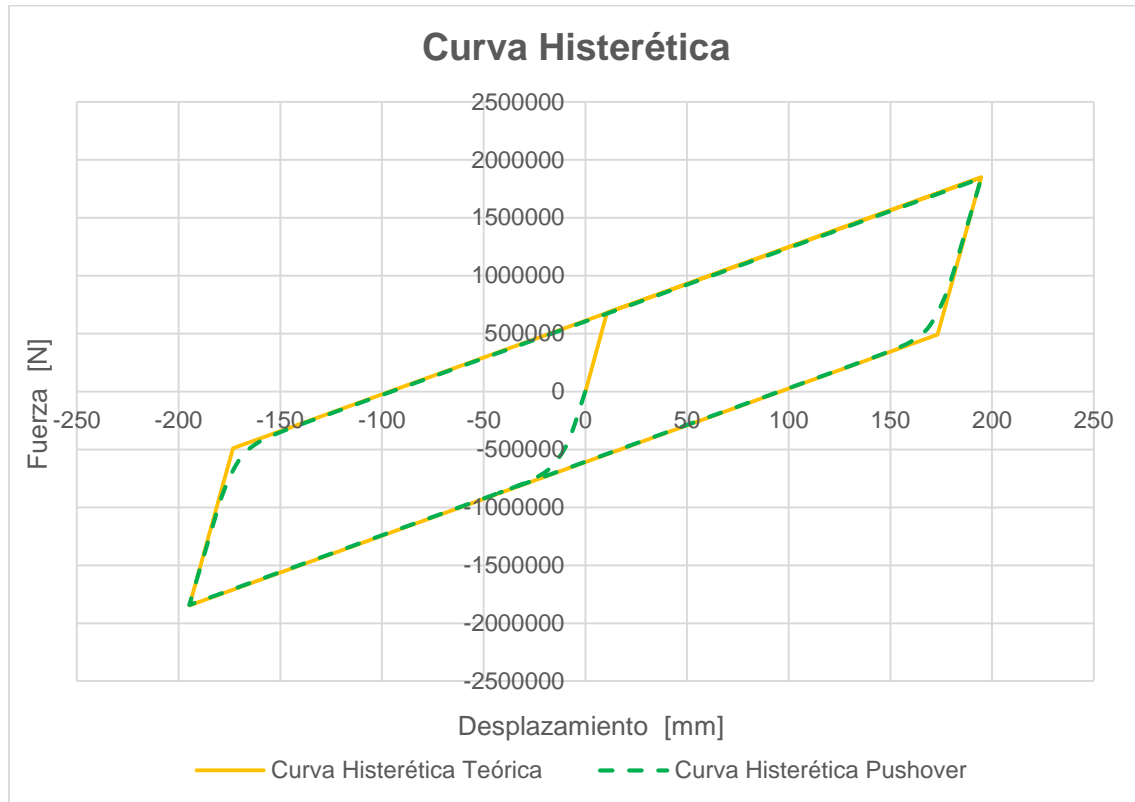


Figura 5.11.- Curva histerética teórica vs curva histerética obtenida de análisis Pushover.

La última verificación de la modelación se la realiza en base al amortiguamiento que brinda el sistema de aislación, en el diseño realizado se tiene que el amortiguamiento es del 20%, esta verificación se realiza mediante un análisis de vibración libre sometiendo al sistema de aislación a un acelerograma (figura 5.12) en un tiempo determinado hasta su reposo total. Con los datos del desplazamiento a través del tiempo se realiza el cálculo del amortiguamiento brindado por parte del sistema mediante decaimiento logarítmico, con lo cual se obtiene 19.89%; existiendo una variación del nula con respecto al teórico:

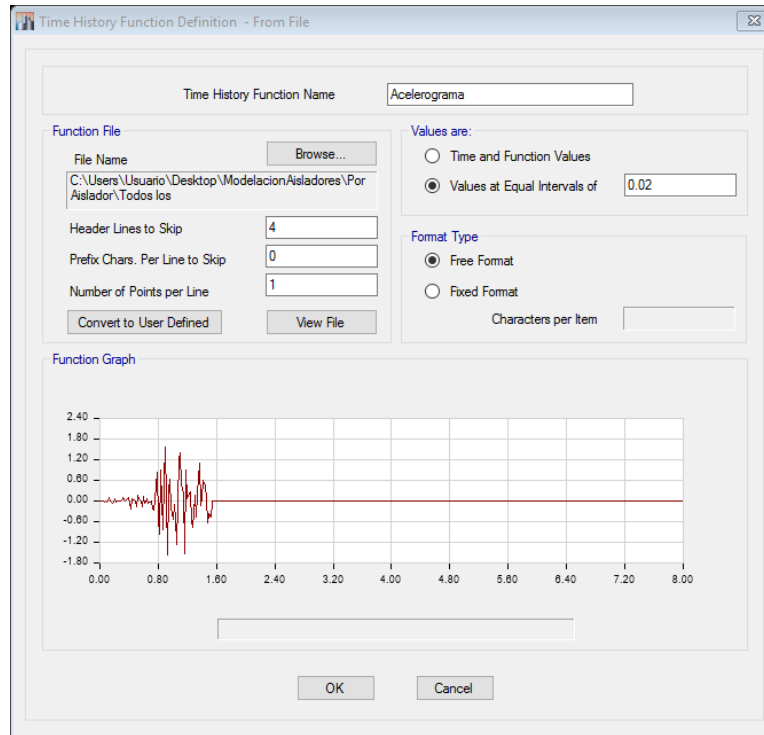


Figura 5.12.-Acelerograma utilizado para análisis de vibración libre “Etabs 2015”.

Amortiguamiento Teórico	0.1989
Amortiguamiento Etabs 2015	0.1989

Tabla 5.11 Comparación de amortiguamiento.

5.4. Verificación de desplazamiento del sistema de aislación

El desplazamiento obtenido en el proceso de diseño teórico debe ser muy próximo al obtenido por la modelación de masa concentrada, si estos difieren se deberá realizar la convergencia correspondiente entre estos dos. Para el análisis espectral se utilizó el sismo de diseño minorado por el coeficiente de amortiguamiento β_D debido a que el espectro de diseño normado está construido para un amortiguamiento del 5% y el amortiguamiento del sistema es de 19.89%, dentro del rango de periodos elongados que va desde 0.8 a 1.2 veces del periodo objetivo (figura 5.13). Se debe considerar que al momento de modelar el sistema de aislación el factor de ductilidad (R) que comúnmente reduce la demanda sísmica en el diseño por ductilidad se debe tomar con el valor de unidad puesto que esta disipación de energía se realiza en el sistema.

Los resultados entre el desplazamiento teórico y el obtenido por la modelación se presenta en la tabla 5.12.

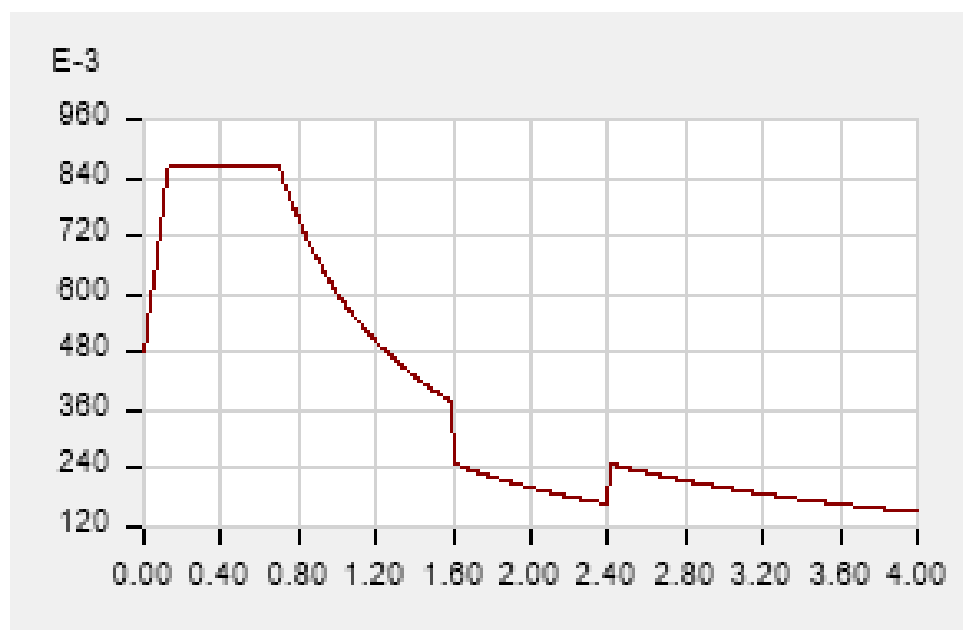


Figura 5.13.- Espectro de diseño considerando el amortiguamiento provisto del sistema en el rango de periodo elongado “Etabs 2015”.

Estructura Tradicional		
Periodo	2.00	s
Amortiguamiento	0.1989	%
Desplazamiento de diseño	194.65	mm
Peso	961612.86	kg
Cortante Basal Empotrado 100%	103854.19	kg
Cortante Basal Empotrado 80%	83083.35	kg
Cortante Basal Aislado 100%	94129.99	kg
Cortante Basal Aislado 90%	84716.99	kg
Desplazamiento Etabs	200.09	mm
Desplazamiento Máximo	300.14	mm
Periodo Max	2.17	s

Tabla 5.12 Propiedades del sistema de aislación teórico y modelado.



La diferencia entre el desplazamiento de diseño teórico y el obtenido por el análisis espectral difieren en 2.79% por lo cual se procede a realizar una afinación de los cálculos partiendo del desplazamiento obtenido en el análisis espectral, recalculando nuevamente el diseño del sistema de aislación y los valores de desplazamiento hasta que estos converjan como se puede observar en la tabla 5.12.

Sistema de Aislación		
Período	2	s
Amortiguamiento	19.91	%
Desplazamiento	200.09	mm
Rigidez Efectiva	9490738.51	N/m
Rigidez Elástica	59180009.8	N/m
Rigidez Plástica	6349245.48	N/m
Fuerza de fluencia	698423.71	N
Energía disipada	475000	J

Tabla 5.13 Propiedades del sistema de aislación.

Aisladores LRB		
Altura goma	20	mm
Altura total	357	mm
Rigidez Efectiva	863049.21	N/m
Rigidez Elástica	9863334.96	N/m
Rigidez Plástica	339467.04	N/m
Fuerza de fluencia	108497.73	N

Tabla 5.14 Propiedades de los aisladores LRB.

Aisladores NRB		
Rigidez Efectiva	359370.27	N/m

Tabla 5.15 Propiedades de los aisladores LRB.

Estructura Tradicional		
Periodo	2.00	s
Amortiguamiento	0.1991	%
Desplazamiento de diseño	200.09	mm
Peso	961612.86	kg
Cortante Basal Empotrado 100%	103854.19	kg
Cortante Basal Empotrado 80%	83083.35	kg
Cortante Basal Aislado 100%	96821.66	kg
Cortante Basal Aislado 90%	87139.49	kg
Desplazamiento Etabs	200.05	mm
Desplazamiento Máximo	300.07	mm
Periodo Max	2.16	s

Tabla 5.16. Propiedades del sistema de aislación teórico y modelado.

La convergencia del desplazamiento entre el modelo y el diseño se puede considerar aceptable puesto que la diferencia entre estos es de apenas 0.02%.

5.5. Modelamiento del sistema de aislación y super-estructura (Múltiples grados de libertad)

Con las verificaciones de un modelamiento correcto de los aisladores NRB y LRB se procede a modelar el sistema con la super-estructura, configurando los aisladores con núcleo de plomo en las cuatro esquinas y en las columnas centrales de la edificación (figura 5.14). Los resultados de la modelación de la estructura aislada varían con respecto al diseño teórico por el motivo de que el sistema de aislación no es lo suficientemente rígido para evitar la transmisión de fuerzas sísmicas a la super-estructura.

Características del modelo del sistema y super-estructura “ETABS 2015”		
Periodo	2.58	s
Desplazamiento	401.6	mm
LRB	6	#
NRB	12	#

Tabla 5.17. Resultados de la estructura aislada

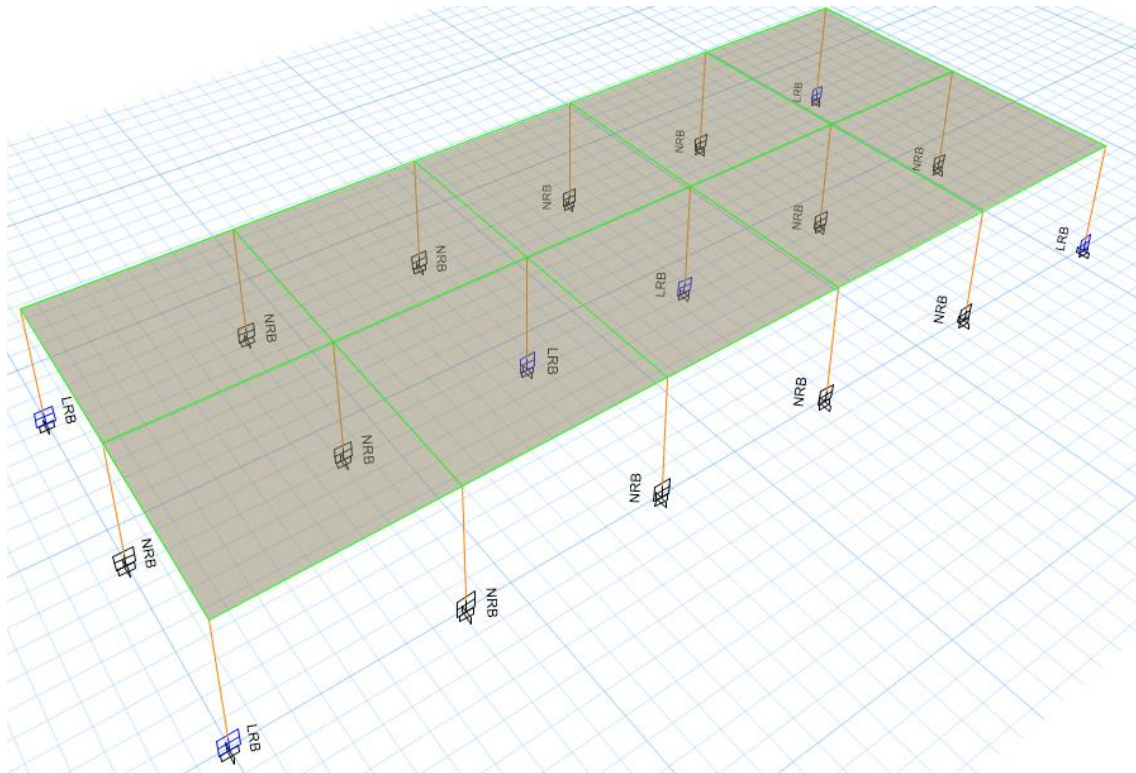


Figura 5.14.-Distribución de aisladores “Etabs 2015”.

La diferencia de valores es muy amplia a la calculada debido la flexibilidad de la estructura, por lo cual, se opta por aumentar el número de aisladores LRB a 16 unidades mejorando ampliamente la respuesta de la edificación aislada con respecto al planteamiento del periodo objetivo.

Real ETABS		
Periodo	2.10	s
Desplazamiento	205.13	mm
LRB	16	#
NRB	2	#

Tabla 5.18. Resultados de la estructura aislada.

5.6. Verificaciones

Las unidades de aisladores deben de cumplir con valores límites para asegurar su correcto funcionamiento como es la fuerza restauradora, pandeo y esfuerzos de corte.



5.6.1. Fuerza restauradora

Para las verificaciones de la fuerza restauradora y de periodo máximo que puede llegar a tener el sistema se tomaron las ecuaciones dadas en (LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators, Michael C. Constantinou et al., 2011).

$$Fr_{ASCE} = \frac{K2_{SA} * D_d}{g * Masa} = 0.135 \geq 0.05$$

$$T_{Max_{ASCE}} = 28 * \sqrt{\frac{D_d}{g}} = 4s \geq T_{Max} = 2.161s$$

5.6.2. Vuelco

Los factores de forma se obtuvieron para los dos tipos de aisladores de base utilizados en el diseño obteniendo como valores:

$$S_{NRB} = 29.894$$

$$S_{LRB} = 22.859$$

Para el cálculo de la carga crítica de pandeo se tomaron las ecuaciones obtenidas por la fórmula general de aisladores circulares (Naeim and Kelly 1999), diferenciando respectivamente entre los aisladores con núcleo y sin núcleo.

$$Pcr_{NRB} = 5707544.646 \text{ N}$$

$$Ar_{NRB} = 0.087 \text{ m}^2$$

$$Pcr'_{NRB} = 2758695.307 \text{ N}$$

$$Pcr_{LRB} = 3458073.561 \text{ N}$$

$$Ar_{LRB} = 0.082 \text{ m}^2$$

$$Pcr'_{LRB} = 1671431.744 \text{ N}$$



5.6.3. Esfuerzos de corte

Para poder calcular los esfuerzos de corte se obtuvieron los coeficientes f_1 y f_2 para los aisladores NRB y LRB respectivamente (Michael C. Constantinou et al. 2011), interpolando de acuerdo a los parámetros establecidos en la tabla correspondiente:

Coeficientes para esfuerzos de corte		
Aislador	f_1	f_2
NRB	1.315	0.285
LRB	1.42	0.295

Tabla 5.19. Factores para el cálculo de los esfuerzos de corte

5.6.4. Valores límites

Los esfuerzos de corte y las verificaciones de cumplimiento de vuelco se verifican el cumplimiento para tres casos diferentes: Cargas de servicio, sismo de diseño y el sismo máximo probable como se estableció anteriormente.

5.6.4.1. Carga de servicio

Para las verificaciones bajo cargas de servicio se tomó la carga máxima que baja sobre un aislador.

$$Pu_{CS} = 1045954.869 \text{ N}$$

Para aisladores NRB

$$\gamma_{C_{NRBCS}} = 1.324$$

$$\gamma_{r_{NRBCS}} = 0.408$$

$$\gamma_{S_{NRBCS}} = 0.6$$

$$\gamma_{C_{NRBCS}} + \gamma_{r_{NRBCS}} + \gamma_{S_{NRBCS}} \leq 6$$

$$2.332 \leq 6$$



$$\frac{Pcr'_{NRB}}{Pu_{cs}} = 2.637 \geq 2$$

Para aisladores LRB

$$\gamma_{C_{LRBcs}} = 1.98$$

$$\gamma_{r_{LRBcs}} = 0.422$$

$$\gamma_{S_{LRBcs}} = 0.6$$

$$\gamma_{C_{LRBcs}} + \gamma_{r_{LRBcs}} + \gamma_{S_{LRBcs}} \leq 6$$

$$3.002 \leq 6$$

$$\frac{Pcr'_{LRB}}{Pu_{cs}} = 1.598 \geq 2$$

La verificación de carga crítica por condiciones de servicio no supero el valor mínimo a cumplir, debido a que el área en la que actúa la fuerza axial es reducida considerablemente por las deformaciones laterales, la solución a implementar es de aumentar el diámetro de los aisladores incrementando el área de porte a cargas axiales bajo deformaciones laterales, consiguiendo el objetivo al tomar un esfuerzo de corte por deformación lateral menor, que conlleva a una altura total de goma de 20cm a 22cm.

Se detalla los resultados finales obtenidos al realizar el diseño completo del sistema de aislación con esta modificación de altura total de elastómero para realizar las verificaciones.

Sistema de Aislación		
Periodo	2	s
Amortiguamiento	19.91	%
Rigidez Efectiva	9490738.5	N/m
Rigidez Elástica	59187247.3	N/m
Rigidez Plástica	6349245.47	N/m
Fuerza de fluencia	698423.71	N
Energía disipada	475433.52	J
Periodo máximo	2.161	s

Tabla 5.20. Tabla de resumen sistema de aislación.



Aisladores LRB		
Diámetro exterior	501.2	mm
Diámetro de plomo	112.6	mm
Altura goma	22	mm
Altura total	360	mm
Rigidez Efectiva	864255.46	N/m
Rigidez Elástica	9864541.216	N/m
Rigidez Plástica	340673.29	N/m
Fuerza de fluencia	108511	N

Tabla 5.21. Tabla de resumen aisladores LRB.

Aisladores NRB		
Diámetro exterior	501.2	mm
Rigidez Efectiva	358767.14	N/m

Tabla 5.22. Tabla de resumen aisladores NRB.

Real ETABS		
Periodo	2.548	s
Desplazamiento	205.818	mm
LRB	6	#
NRB	12	#

Tabla 5.23. Resultado de estructura aislada.

Los resultados obtenidos por el cálculo numérico fueron modelados resultando en la variación de periodo y desplazamiento del sistema de aislación debido a la rigidez de la estructura, por lo cual se incrementó el número de unidades de aislamiento LRB hasta obtener valores acordes con el planteamiento objetivo.

Estructura aislada		
Periodo	2.085	s
Desplazamiento	149.732	mm
LRB	16	#
NRB	2	#

Tabla 5.24. Resultados de la estructura aislada.



Con el nuevo sistema de aislación diseñado se procede a realizar las verificaciones para asegurar el correcto funcionamiento del aislamiento basal.

Fuerza restauradora

Verificación de la fuerza restaurada y del periodo máximo que puede llegar a tener el sistema se tomaron las ecuaciones dadas en (LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators, Michael C. Constantinou et al., 2011).

$$Fr_{ASCE} = \frac{K_{2SA} * D_d}{g * Masa} = 0.101 \geq 0.05$$

$$T_{MaxASCE} = 28 * \sqrt{\frac{D_d}{g}} = 3.46s \geq T_{Max} = 2.161s$$

Vuelco

Los factores de forma se obtuvieron para los dos tipos de aisladores de base utilizados en el diseño obteniendo como valores:

$$S_{NRB} = 31.327$$

$$S_{LRB} = 24.292$$

Cálculo de la carga crítica de pandeo.

$$Pcr_{NRB} = 6257243.137N$$

$$Ar_{NRB} = 0.1 m^2$$

$$Pcr'_{NRB} = 3163497.988 N$$

$$Pcr_{LRB} = 34384318.469 N$$

$$Ar_{LRB} = 0.095 m^2$$

$$Pcr'_{LRB} = 2216596.407 N$$



Esfuerzos de corte

Para poder calcular los esfuerzos de corte se obtuvieron los coeficientes f_1 y f_2 para los aisladores NRB y LRB.

Coeficientes para esfuerzos de corte		
Aislador	f_1	f_2
NRB	1.3325	0.28
LRB	1.43	0.225

Tabla 5.25. Factores para el cálculo de los esfuerzos de corte

Carga de servicio

Para las verificaciones se tomó la carga máxima que baja sobre un aislador para estar del lado de la seguridad.

$$Pu_{CS} = 1045954.869 \text{ N}$$

Para aisladores NRB

$$\gamma_{CNRBCS} = 0.901$$

$$\gamma_{rNRBCS} = 0.4$$

$$\gamma_{SNRBCS} = 0.008$$

$$\gamma_{CNRBCS} + \gamma_{rNRBCS} + \gamma_{SNRBCS} \leq 6$$

$$1.309 \leq 6$$

$$\frac{P_{cr'NRB}}{Pu_{CS}} = 3.741 \geq 2$$

Para aisladores LRB

$$\gamma_{CLRBCS} = 1.314$$

$$\gamma_{rLRBCS} = 0.321$$



$$\gamma_{S_{LRBcs}} = 0.008$$

$$\gamma_{C_{LRBcs}} + \gamma_{r_{LRBcs}} + \gamma_{S_{LRBcs}} \leq 6$$

$$1.643 \leq 6$$

$$\frac{Pcr'_{LRB}}{Pu_{cs}} = 2.621 \geq 2$$

Sismo de diseño

Para las verificaciones bajo cargas de sismo de diseño se tomó la carga máxima que baja sobre un aislador para estar del lado de la seguridad.

$$Pu_{SD} = 1319255.08 \text{ N}$$

Para aisladores NRB

$$\gamma_{C_{NRBSD}} = 1.137$$

$$\gamma_{S_{NRBSD}} = 0.685$$

$$\gamma_{C_{NRBSD}} + 0.5 * \gamma_{r_{NRBSD}} + \gamma_{S_{NRBSD}} \leq 7$$

$$2.021 \leq 7$$

$$\frac{Pcr'_{NRB}}{Pu_{SD}} = 2.966$$

Para aisladores LRB

$$\gamma_{C_{LRBSD}} = 1.657$$

$$\gamma_{S_{LRBSD}} = 0.685$$



$$\gamma C_{LRB_{SD}} + 0.5 * \gamma r_{LRB_{SD}} + \gamma S_{LRB_{SD}} \leq 7$$

$$2.502 \leq 7$$

$$\frac{Pcr'_{LRB}}{Pu_{SD}} = 2.078$$

Sismo máximo probable

Para las verificaciones bajo cargas de sismo máximo probable se tomó la carga máxima que baja sobre un aislador para estar del lado de la seguridad.

$$Pu_{MCE} = 1688968.453 \text{ N}$$

Para aisladores NRB

$$\gamma C_{NRB_{MCE}} = 1.8$$

$$\gamma S_{NRB_{MCE}} = 1.606$$

$$\gamma C_{NRB_{SD}} + 0.25 * \gamma r_{NRB_{SD}} + \gamma S_{NRB_{SD}} \leq 9$$

$$3.506 \leq 9$$

$$\frac{Pcr'_{NRB}}{Pu_{MCE}} = 11.873 \geq 1.1$$

Para aisladores LRB

$$\gamma C_{LRB_{MCE}} = 2.624$$

$$\gamma S_{LRB_{MCE}} = 1.606$$

$$\gamma C_{LRB_{SD}} + 0.25 * \gamma r_{LRB_{SD}} + \gamma S_{LRB_{SD}} \leq 9$$

$$4.31 \leq 9$$



$$\frac{Pcr'_{LRB}}{Pu_{SD}} = 1.312 \geq 1.1$$

Al realizar y cumplir con las respectivas comprobaciones de las unidades de aislamiento se procede a realizar el análisis por desempeño de la estructura estudiada.

6. Análisis por desempeño y resultados

“Los procedimientos del diseño sísmico basado en desempeño requieren una cuantificación de rendimiento (desempeño), basado en uno o algunos índices estructurales”. El reglamento para la rehabilitación sísmica de edificios (FEMA 356) establece el nivel de desempeño de estructuras rehabilitadas en su apartado 1.5. El nivel de desempeño se obtiene de una combinación estructural y no estructural. La tabla C1-3 (FEMA 356) limita aproximadamente el nivel de daño estructural que se puede esperar luego de rehabilitada la estructura, el cual se presenta a continuación para estructuras de hormigón (caso de análisis):

Table C1-3 Structural Performance Levels and Damage^{1, 2, 3}—Vertical Elements				
Elements	Type	Structural Performance Levels		
		Collapse Prevention S-5	Life Safety S-3	Immediate Occupancy S-1
Concrete Frames	Primary	Extensive cracking and hinge formation in ductile elements. Limited cracking and/or splice failure in some nonductile columns. Severe damage in short columns.	Extensive damage to beams. Spalling of cover and shear cracking (<1/8" width) for ductile columns. Minor spalling in nonductile columns. Joint cracks <1/8" wide.	Minor hairline cracking. Limited yielding possible at a few locations. No crushing (strains below 0.003).
	Secondary	Extensive spalling in columns (limited shortening) and beams. Severe joint damage. Some reinforcing buckled.	Extensive cracking and hinge formation in ductile elements. Limited cracking and/or splice failure in some nonductile columns. Severe damage in short columns.	Minor spalling in a few places in ductile columns and beams. Flexural cracking in beams and columns. Shear cracking in joints <1/16" width.
	Drift	4% transient or permanent	2% transient; 1% permanent	1% transient; negligible permanent

Figura 6.1 Daño y niveles de desempeño estructural para estructuras de concreto.

Las tablas C1-5 a C1-7 contienen los niveles de desempeño para componentes no estructurales:

Table C1-5 Nonstructural Performance Levels and Damage¹—Architectural Components

Component	Nonstructural Performance Levels			
	Hazards Reduced ² N-D	Life Safety N-C	Immediate Occupancy N-B	Operational N-A
Cladding	Severe distortion in connections. Distributed cracking, bending, crushing, and spalling of cladding elements. Some fracturing of cladding, but panels do not fall in areas of public assembly.	Severe distortion in connections. Distributed cracking, bending, crushing, and spalling of cladding elements. Some fracturing of cladding, but panels do not fall.	Connections yield; minor cracks (<1/16" width) or bending in cladding.	Connections yield; minor cracks (<1/16" width) or bending in cladding.
Glazing	General shattered glass and distorted frames in unoccupied areas. Extensive cracked glass; little broken glass in occupied areas.	Extensive cracked glass; little broken glass.	Some cracked panes; none broken.	Some cracked panes; none broken.
Partitions	Distributed damage; some severe cracking, crushing, and racking in some areas.	Distributed damage; some severe cracking, crushing, and racking in some areas.	Cracking to about 1/16" width at openings. Minor crushing and cracking at corners.	Cracking to about 1/16" width at openings. Minor crushing and cracking at corners.
Ceilings	Extensive damage. Dropped suspended ceiling tiles. Moderate cracking in hard ceilings.	Extensive damage. Dropped suspended ceiling tiles. Moderate cracking in hard ceilings.	Minor damage. Some suspended ceiling tiles disrupted. A few panels dropped. Minor cracking in hard ceilings.	Generally negligible damage. Isolated suspended panel dislocations, or cracks in hard ceilings.
Parapets & Ornamentation	Extensive damage; some falling in unoccupied areas.	Extensive damage; some falling in unoccupied areas.	Minor damage.	Minor damage.
Canopies & Marquees	Moderate damage.	Moderate damage.	Minor damage.	Minor damage.
Chimneys & Stacks	Extensive damage. No collapse.	Extensive damage. No collapse.	Minor cracking.	Negligible damage.
Stairs & Fire Escapes	Extensive racking. Loss of use.	Some racking and cracking of slabs. Usable.	Minor damage.	Negligible damage.
Doors	Distributed damage. Many racked and jammed doors.	Distributed damage. Some racked and jammed doors.	Minor damage. Doors operable.	Minor damage. Doors operable.

1. Damage states indicated in this table are provided to allow an understanding of the severity of damage that may be sustained by various nonstructural elements meeting the Nonstructural Performance Levels defined in this standard. These damage states are not intended for use in post-earthquake evaluation of damage or for judging the safety or required level of repair following an earthquake.

2. For the Hazards Reduced Performance Level, high hazard nonstructural components evaluated or rehabilitated to the Life Safety criteria will have Hazards Reduced performance identical to that expected for the Life Safety Performance Level.



Table C1-6 Nonstructural Performance Levels and Damage¹—Mechanical, Electrical, and Plumbing Systems/Components

System/Component	Nonstructural Performance Levels			
	Hazards Reduced ² N-D	Life Safety N-C	Immediate Occupancy N-B	Operational N-A
Elevators	Elevators out of service; counterweights off rails.	Elevators out of service; counterweights do not dislodge.	Elevators operable; can be started when power available.	Elevators operate.
HVAC Equipment	Most units do not operate; many slide or overturn; some suspended units fall.	Units shift on supports, rupturing attached ducting, piping, and conduit, but do not fail.	Units are secure and most operate if power and other required utilities are available.	Units are secure and operate. Emergency power and other utilities provided, if required.
Manufacturing Equipment	Units slide and overturn; utilities disconnected. Heavy units require reconnection and realignment. Sensitive equipment may not be functional.	Units slide, but do not overturn; utilities not available; some realignment required to operate.	Units secure, and most operable if power and utilities available.	Units secure and operable; power and utilities available.
Ducts	Ducts break loose of equipment and louvers; some supports fail; some ducts fall.	Ducts break loose of equipment and louvers; some supports fail; some ducts fall.	Minor damage at joints, but ducts remain serviceable.	Negligible damage.
Piping	Some lines rupture. Some supports fail. Some piping falls.	Minor damage at joints, with some leakage. Some supports damaged, but systems remain suspended.	Minor leaks develop at a few joints.	Negligible damage.
Fire Sprinkler Systems	Some sprinkler heads damaged by collapsing ceilings. Leaks develop at couplings. Some branch lines fail.	Some sprinkler heads damaged by swaying ceilings. Leaks develop at some couplings.	Minor leakage at a few heads or pipe joints. System remains operable.	Negligible damage.
Fire Alarm Systems	Ceiling mounted sensors damaged. May not function.	Ceiling mounted sensors damaged. May not function.	System is functional.	System is functional.
Emergency Lighting	Some lights fall. Power may not be available.	Some lights fall. Power may be available from emergency generator.	System is functional.	System is functional.
Electrical Distribution Equipment	Units slide and/or overturn, rupturing attached conduit. Uninterruptible Power Source systems fail. Diesel generators do not start.	Units shift on supports and may not operate. Generators provided for emergency power start; utility service lost.	Units are secure and generally operable. Emergency generators start, but may not be adequate to service all power requirements.	Units are functional. Emergency power is provided, as needed.
Light Fixtures	Many broken light fixtures. Falling hazards generally avoided in heavier fixtures (>20 pounds) in areas of public assembly.	Many broken light fixtures. Falling hazards generally avoided in heavier fixtures (> 20 pounds).	Minor damage. Some pendant lights broken.	Negligible damage.

Table C1-7 Nonstructural Performance Levels and Damage¹—Contents

Contents	Nonstructural Performance Levels			
	Hazards Reduced ² N-D	Life Safety N-C	Immediate Occupancy N-B	Operational N-A
Computer Systems	Units roll and overturn, disconnect cables. Raised access floors collapse. Power not available.	Units shift and may disconnect cables, but do not overturn. Power not available.	Units secure and remain connected. Power may not be available to operate, and minor internal damage may occur.	Units undamaged and operable; power available.
Desktop Equipment	Some equipment slides off desks.	Some equipment slides off desks.	Some equipment slides off desks.	Equipment secured to desks and operable.
File Cabinets	Cabinets overturn and spill contents.	Cabinets overturn and spill contents.	Drawers slide open, but cabinets do not tip.	Drawers slide open, but cabinets do not tip.
Book Shelves	Shelves overturn and spill contents.	Books slide off shelves.	Books slide on shelves.	Books remain on shelves.
Hazardous Materials	Minor damage; occasional materials spilled; gaseous materials contained.	Minor damage; occasional materials spilled; gaseous materials contained.	Negligible damage; materials contained.	Negligible damage; materials contained.
Art Objects	Objects damaged by falling, water, dust.	Objects damaged by falling, water, dust.	Some objects may be damaged by falling.	Objects undamaged.

1. Damage states indicated in this table are provided to allow an understanding of the severity of damage that may be sustained by various nonstructural elements meeting the Nonstructural Performance Levels defined in this standard. These damage states are not intended for use in post-earthquake evaluation of damage or for judging the safety or required level of repair following an earthquake.
2. For the Hazards Reduced Performance Level, high hazard nonstructural components evaluated or rehabilitated to the Life Safety criteria will have Hazards Reduced performance identical to that expected for the Life Safety Performance Level.

La combinación de estos niveles de desempeño estructural y no estructural definen el nivel de desempeño de la estructura rehabilitada. La tabla C1-8 (FEMA 356) resume los niveles de desempeño y sus rangos.

Table C1-8 Target Building Performance Levels and Ranges

Nonstructural Performance Levels	Structural Performance Levels and Ranges					
	S-1 Immediate Occupancy	S-2 Damage Control Range	S-3 Life Safety	S-4 Limited Safety Range	S-5 Collapse Prevention	S-6 Not Considered
N-A Operational	Operational 1-A	2-A	Not recommended	Not recommended	Not recommended	Not recommended
N-B Immediate Occupancy	Immediate Occupancy 1-B	2-B	3-B	Not recommended	Not recommended	Not recommended
N-C Life Safety	1-C	2-C	Life Safety 3-C	4-C	5-C	6-C
N-D Hazards Reduced	Not recommended	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
N-E Not Considered	Not recommended	Not recommended	Not recommended	4-E	Collapse Prevention 5-E	No rehabilitation

Se realiza análisis con espectros y registros acelerográficos del ultimo evento sísmico ocurrido el 16 de abril de 2016, correctamente escalados de acuerdo a lo establecido por la ASCE7-10 16.1.3.2. A continuación se muestra los datos de la estación y su espectro de aceleración:

RED: RENAC

Estación: AOTA

Latitud: 0,240°

Longitud: -78,256°

Altitud: 2529 m



Figura 6.1 Espectro del acelerograma escalado para la estructura empotrada.



Figura 6.2 Espectro del acelerograma escalado para la estructura aislada.

6.1. Análisis lineal

En el siguiente apartado se realiza un análisis del tipo lineal para la estructura empotrada y aislada con el objetivo de comparar el comportamiento frente a un evento sísmico establecido y cuantificar su respuesta.

6.1.1. Análisis modal espectral

Se representará los resultados condensados en gráficas cuantitativas correspondientes a desplazamientos, derivas, cortantes de piso y resistencia de elementos estructurales.

- Desplazamiento: Los desplazamientos de la estructura aislada son ligeramente mayores respecto de la empotrada, tomando en cuenta que el daño producido en la estructura empotrada es total al considerar en su diseño un factor de ductilidad de orden 8, mientras que la estructura aislada contempla ductilidad de apenas 2. Esto presenta a la aislación basal como un sistema óptimo frente a fuerzas laterales. Se observa que el desplazamiento que ocurre en el primer piso se debe a una disminución de rigidez debido a que la estructura aislada debe contemplar una conexión de los elementos columnas sobre los aisladores en este tipo de restauraciones.

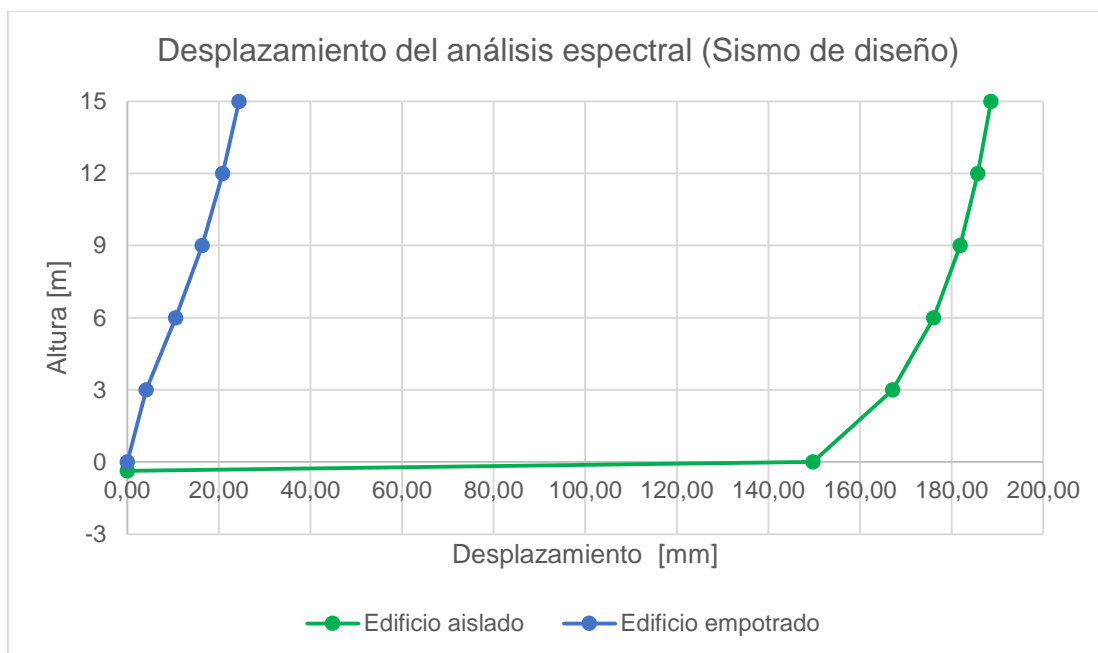


Figura 6.3 Comparación de desplazamiento de las estructuras.

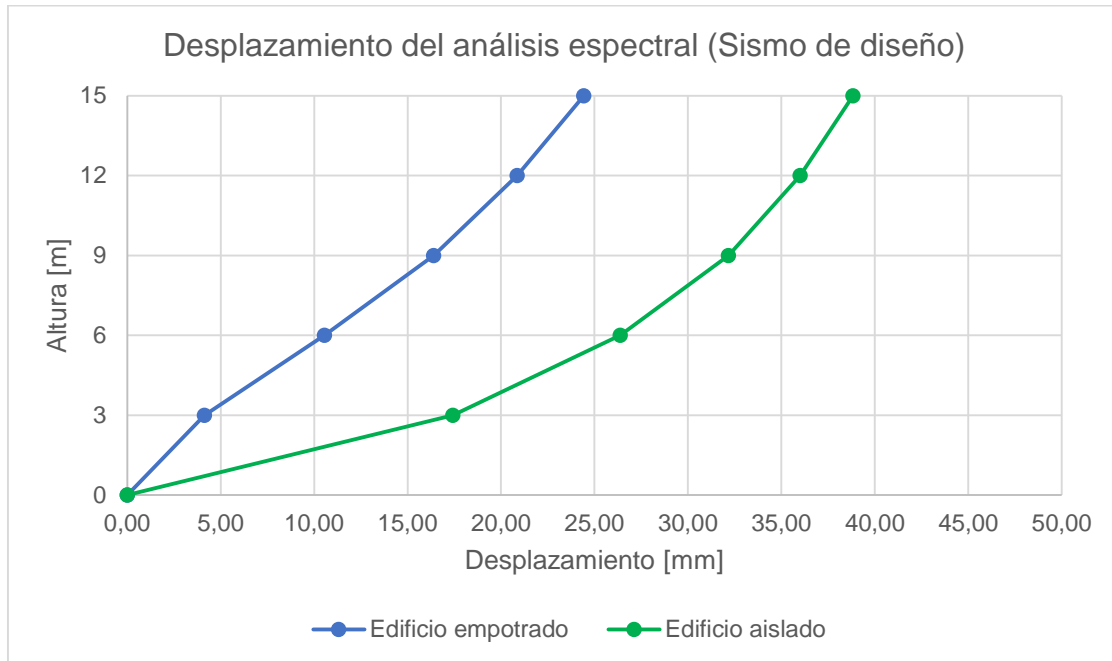


Figura 6.4 Comparación de desplazamiento de las estructuras respecto a la base.

- Deriva: La deriva de piso para el sistema de aislamiento está limitada por la ASCE7-10 en su apartado 17.5.6 con un valor de 1.5% de la altura de piso. En la estructura aislada se ha obtenido un valor de deriva máxima de 0.9% cumpliendo con el reglamento. Obteniendo según “El reglamento para la rehabilitación sísmica de edificios” (FEMA 356) el mejor nivel de desempeño (ocupación inmediata) para elementos estructurales.

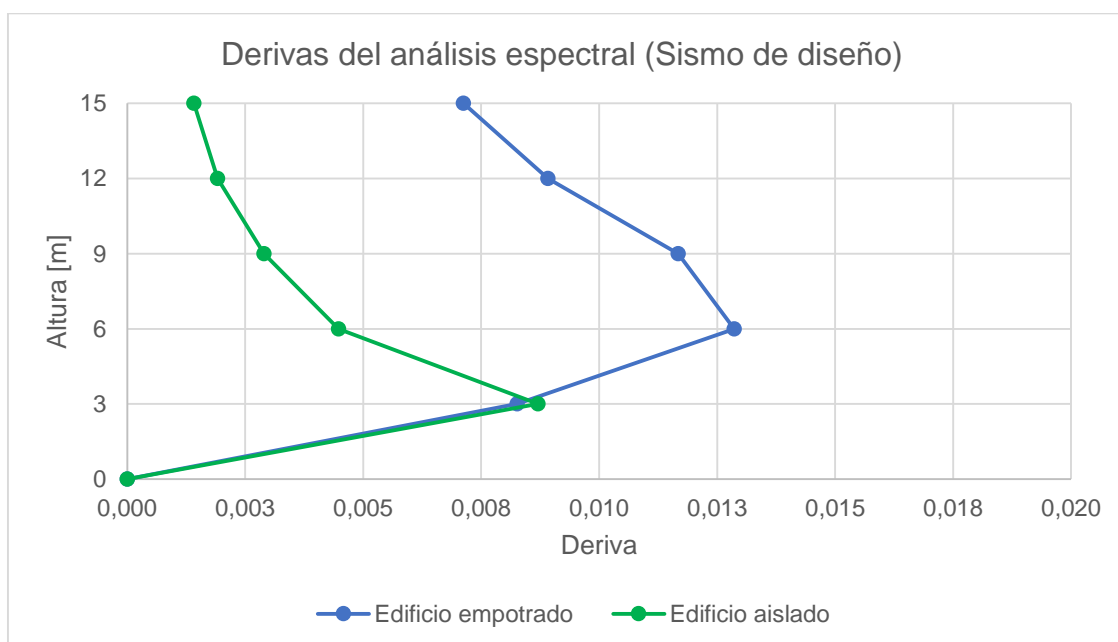


Figura 6.5 Comparación de derivas de las estructuras.

- Cortante de piso: El cortante basal transmitido del sistema de aislación ($R=1$) a la superestructura ($R=2$) se ve incrementado en los primeros pisos relajándose por el funcionamiento del sistema hacia los pisos superiores.

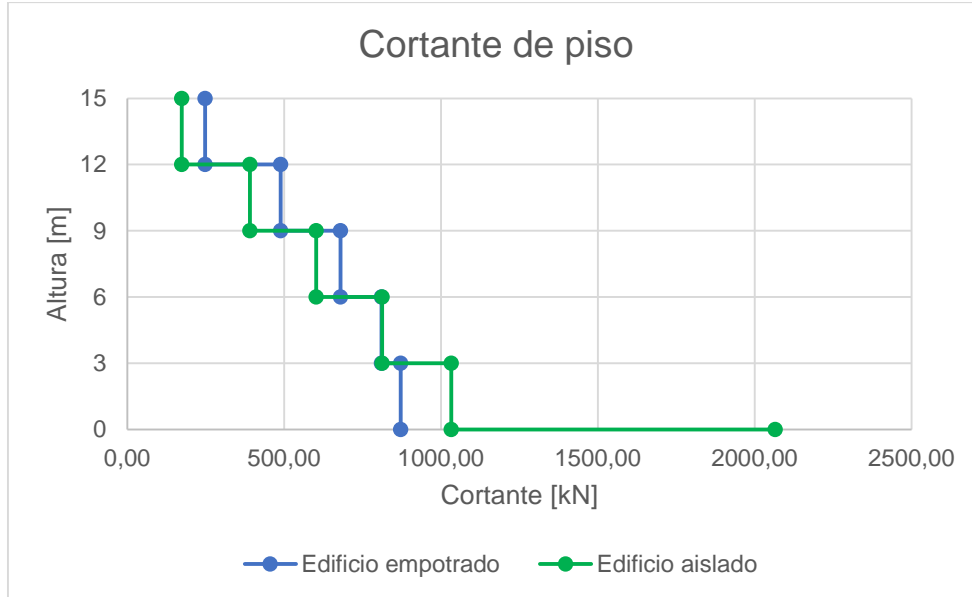


Figura 6.6 Comparación de cortante de piso de las estructuras.

- Demanda-capacidad de elementos estructurales: Se muestra que las solicitaciones en los elementos estructurales tipo vigas del primer piso (tabla 6.1) han sobrepasado la capacidad (tabla 6.2) debido a la restauración mediante el sistema de aislación por lo que se recomienda su debido refuerzo. La demanda máxima en los elementos columna son menores que las del sistema empotrado como se ilustra en la figura 6.7 para los pisos del 1 al 3 y en la figura 6.8 para los pisos 4 y 5.

	Vigas Entrepiso			
	Pu (Kgf)	Vu (kgf)	Tu (kgf-m)	Mu (kgf-m)
Edificio empotrado	477.09	9571.79	81.14	9956.88
	-464.15	-9571.79	-81.14	-12961.37
Edificio aislado	668.02	12793.11	89.32	14374.3
	-339.45	-12793.11	-89.32	-19846.8

Tabla 6.1 Demanda máxima de elementos estructurales vigas (entrepiso)

Capacidad del elemento

Momento (+)	11528.9942	kgf-m
Momento (-)	16440.0609	kgf-m
Cortante	21111.5026	kgf

Tabla 6.2 Capacidad de elementos estructurales vigas (entrepiso)

	Vigas Cubierta			
	Pu (kgf)	Vu (kgf)	Tu (kgf-m)	Mu (kgf-m)
Edificio empotrado	318.11	4619.02	39.65	2895.99
	-502.15	-4619.02	-39.65	-4304.5
Edificio aislado	37.26	4619	39.66	2896.01
	-418.35	-4919	-39.66	-3998.24

Tabla 6.3 Capacidad de elementos estructurales vigas (cubierta)

Capacidad del elemento		
Momento (+)	3292.76884	kgf-m
Momento (-)	5089.2138	kgf-m
Cortante	13194.6891	kgf

Tabla 6.4 Capacidad de elementos estructurales vigas (entrepiso)

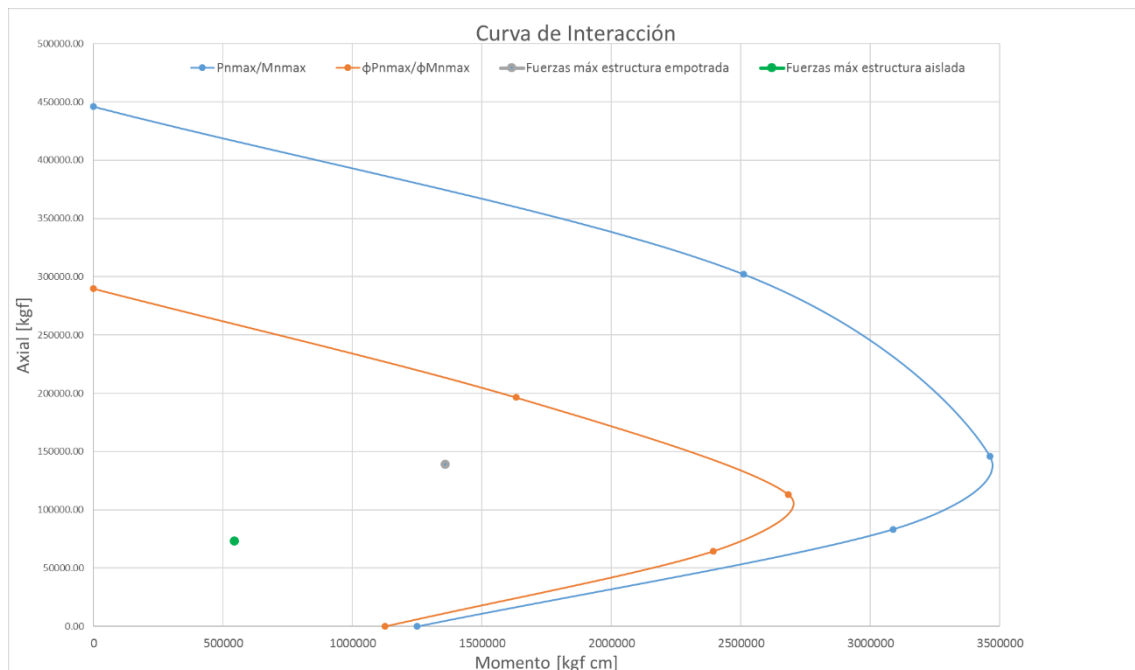


Figura 6.7 Demanda máxima en elementos estructurales tipo columna (pisos 1-3).

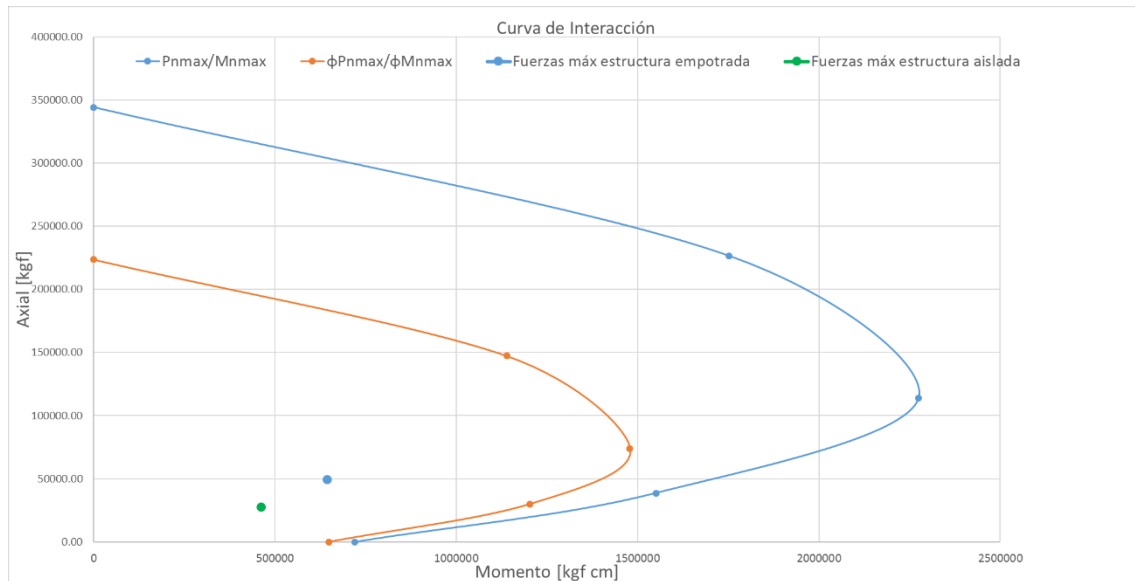


Figura 6.8 Demanda máxima en elementos estructurales tipo columna (pisos 4-5).

6.1.2. Análisis tiempo historia

Se representa los resultados condensados en gráficas cuantitativas correspondientes a desplazamientos, derivas y cortantes de piso.

- Desplazamiento: Se observa que los desplazamientos obtenidos según el análisis tiempo-historia varían considerablemente con los obtenidos por el espectro de respuesta, debido a los valores pico existentes en el espectro de acelerograma escalado.

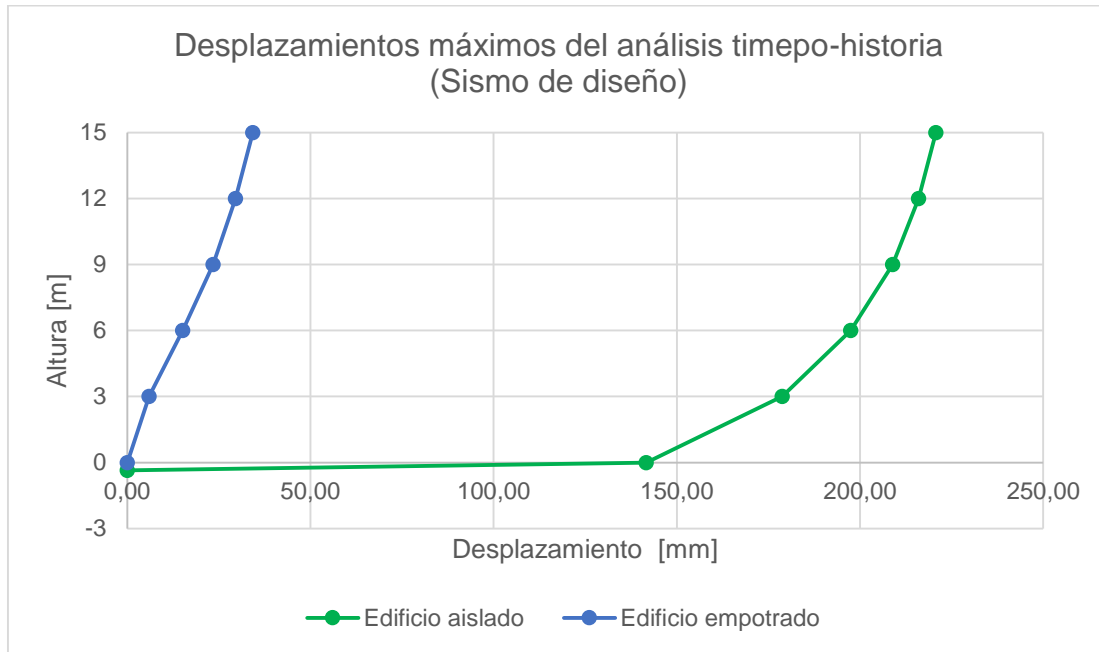


Figura 6.9 Comparación de desplazamiento de las estructuras.

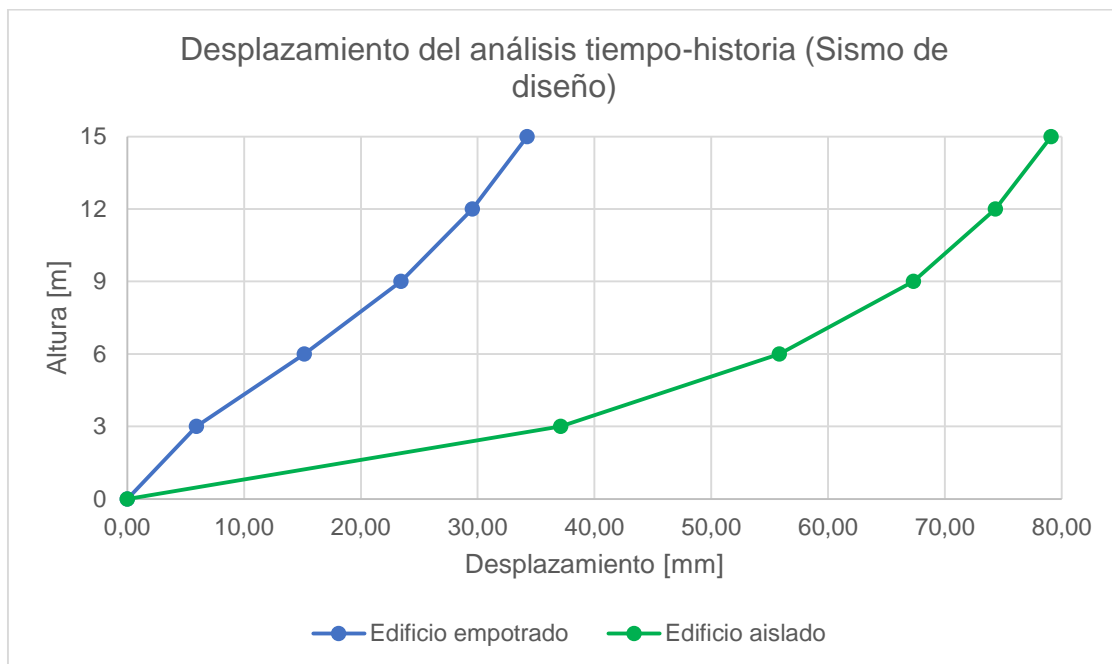


Figura 6.10 Comparación de desplazamiento de las estructuras respecto a la base.

- Deriva: Se observa que los valores de deriva de piso obtenidos según el análisis tiempo-historia varían considerablemente con los obtenidos por el espectro de respuesta. Estos valores sobrepasan los límites de diseño establecido en el código ASCE 7-10 17.5.6 debido a los valores pico existentes en el espectro de acelerograma escalado.

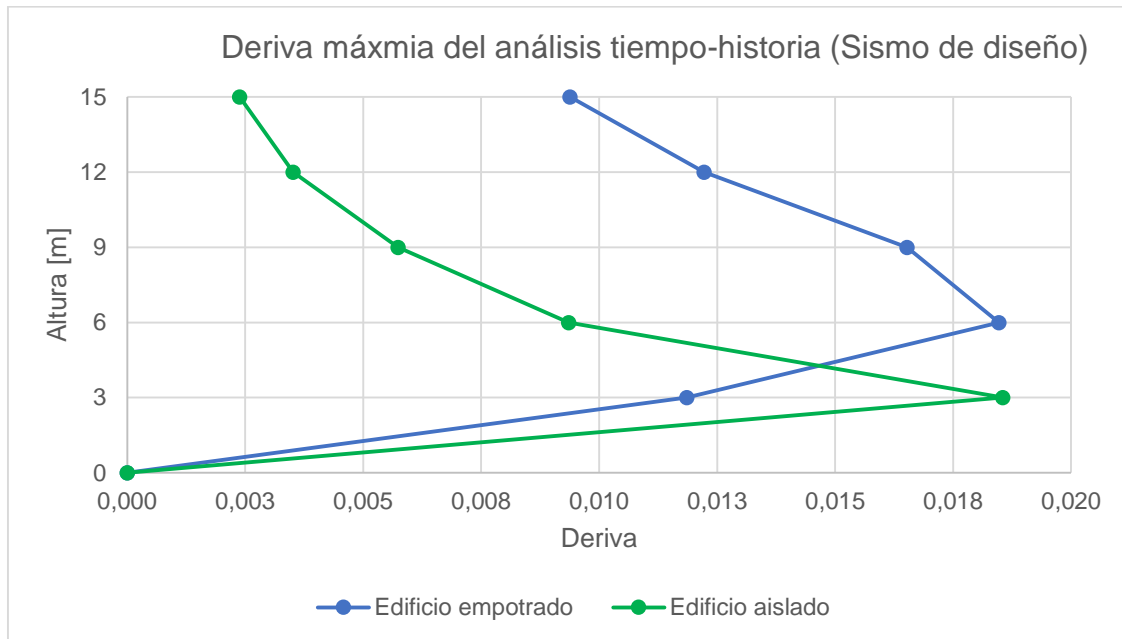


Figura 6.11 Comparación de derivas de las estructuras.

- Cortante de piso: El sistema de aislamiento cumple con su función de reducir el cortante basal que pasa a la super-estructura. Los valores de cortante de piso que se obtienen son mayores que los del espectro de respuesta como se ha comentado anteriormente.

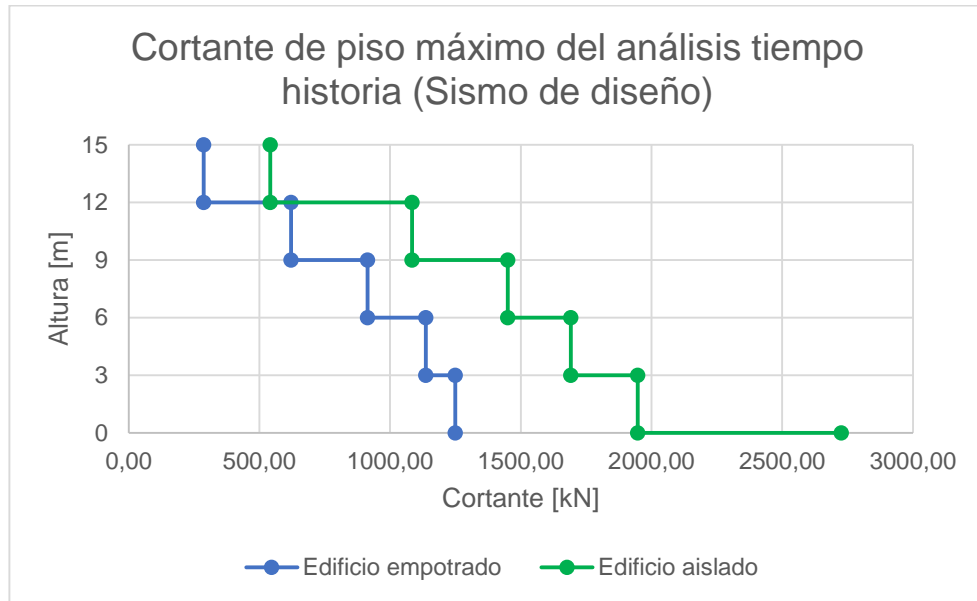


Figura 6.12 Comparación de cortante de piso de las estructuras.

6.2. Análisis no lineal

En el siguiente apartado se realiza un análisis del tipo no lineal para la estructura aislada con el objetivo analizar su respuesta frente a un evento sísmico.

6.2.1. Análisis tiempo historia (DBE)

- Desplazamiento: De acuerdo al análisis no lineal se obtuvo un desplazamiento de 129.087 mm sin exceder el desplazamiento de diseño.

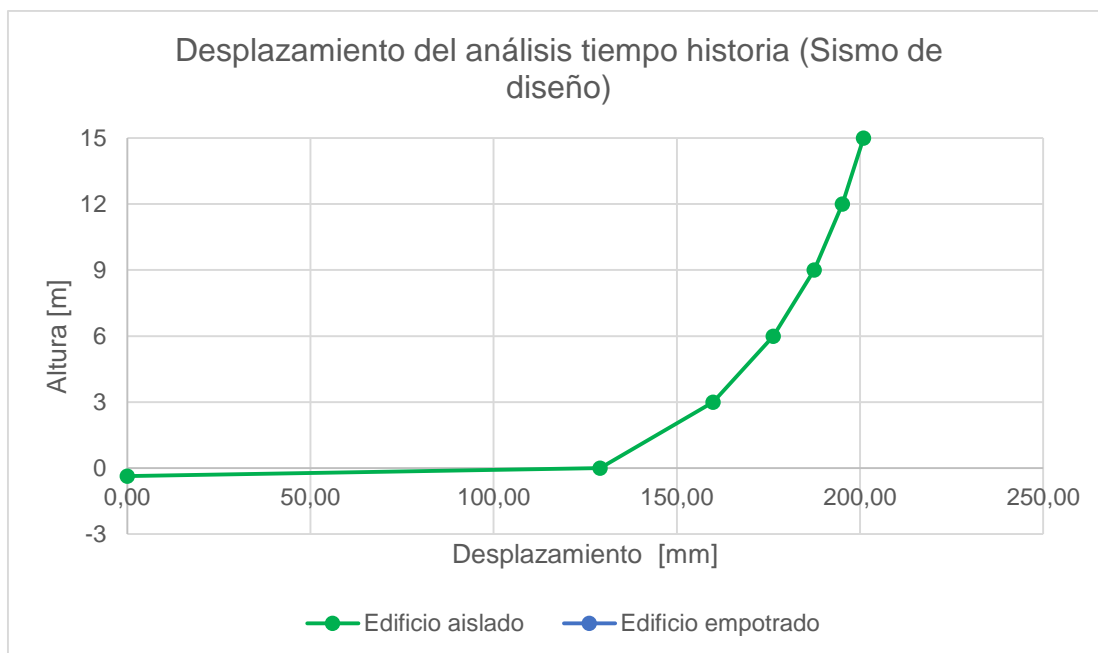


Figura 6.13 Desplazamiento máximo de la estructura aislada.

- Deriva: La deriva de piso para el sistema de aislamiento está limitada por la ASCE7-10 en su apartado 17.6.4.4 con un valor de 2% de la altura de piso. En la estructura aislada se ha obtenido un valor de deriva máxima de 1.5% cumpliendo con el reglamento. Obteniendo según “El reglamento para la rehabilitación sísmica de edificios” (FEMA 356) un nivel de desempeño de seguridad de vida para elementos estructurales.

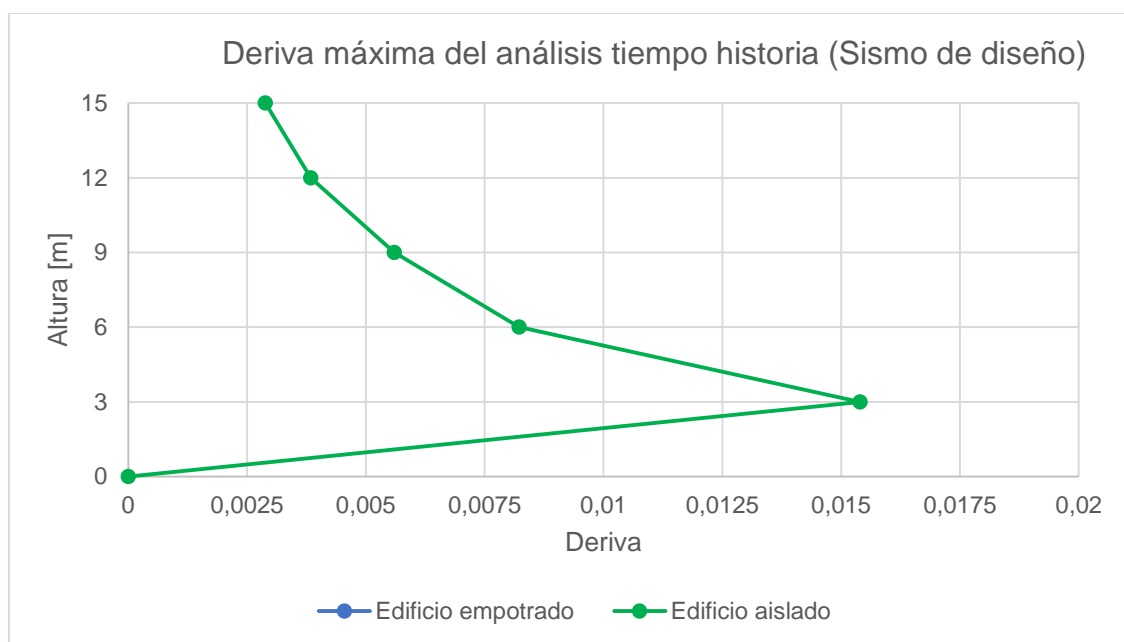


Figura 6.14 Deriva máxima de la estructura aislada.

- Curva de histéresis: A continuación, se muestra la disipación de energía de un aislador LRB durante la duración de un evento sísmico.

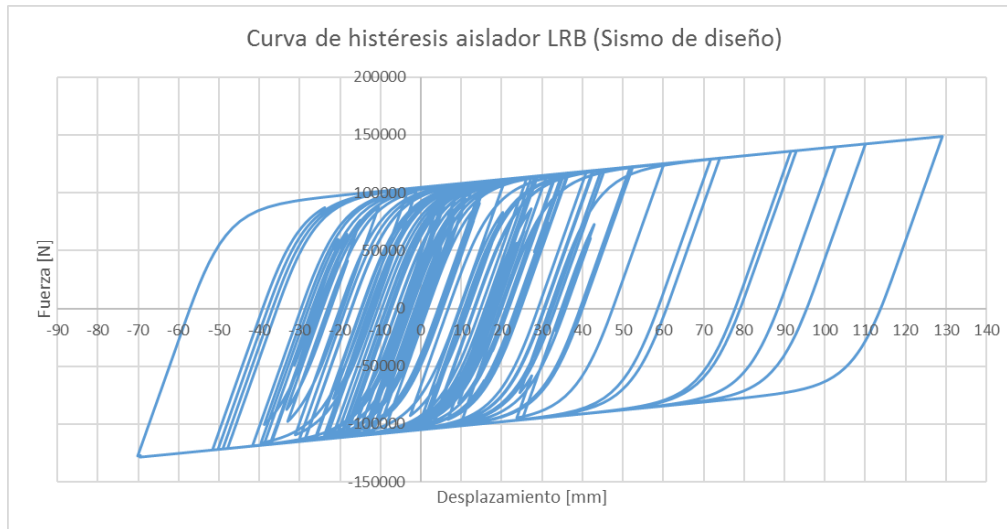


Figura 6.15 Curva de histéresis del aislador LRB bajo efectos de sismo de diseño.

6.2.2. Análisis tiempo historia (MCE):

- Desplazamiento: El desplazamiento en la base es de 175.506 mm sin sobrepasar el desplazamiento máximo al que puede llegar el aislador.



Figura 6.16 Desplazamiento máximo de la estructura aislada.

- Deriva: La deriva de piso para el sistema de aislamiento está limitada por la ASCE7-10 en su apartado 17.6.4.4 con un valor de 2% de la altura de piso. En

la estructura aislada se ha obtenido un valor de deriva máxima de 1.5% cumpliendo con el reglamento. Obteniendo según “El reglamento para la rehabilitación sísmica de edificios” (FEMA 356) un nivel de desempeño de seguridad de vida para elementos estructurales.

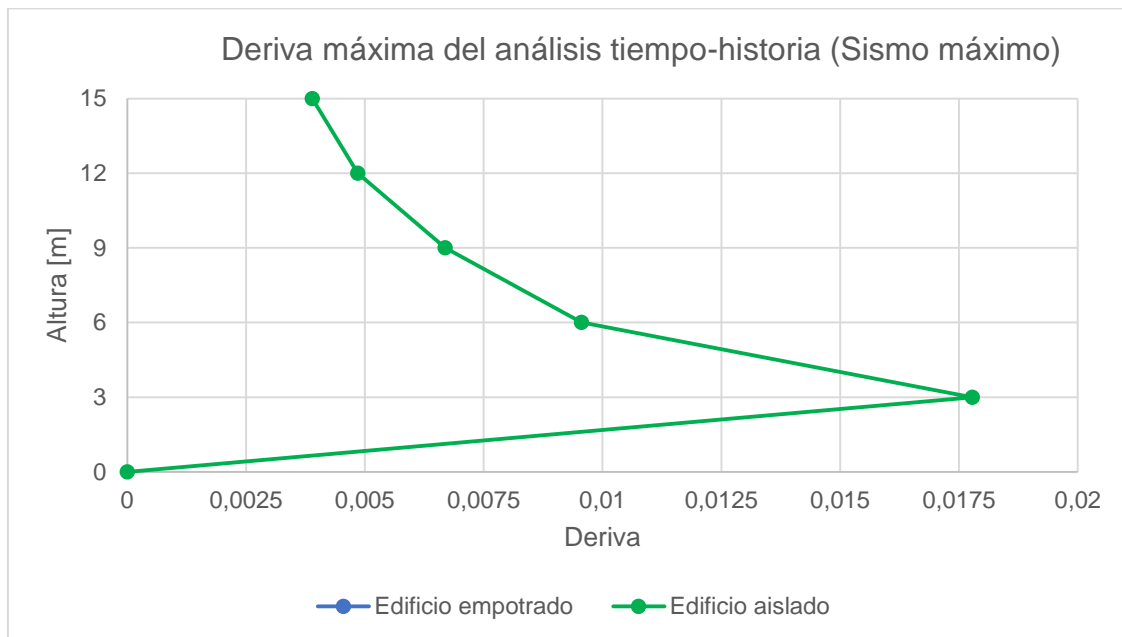


Figura 6.17 Deriva máxima de la estructura aislada.

- Curva de histéresis: A continuación, se muestra la disipación de energía de un aislador LRB durante la duración de un evento sísmico.

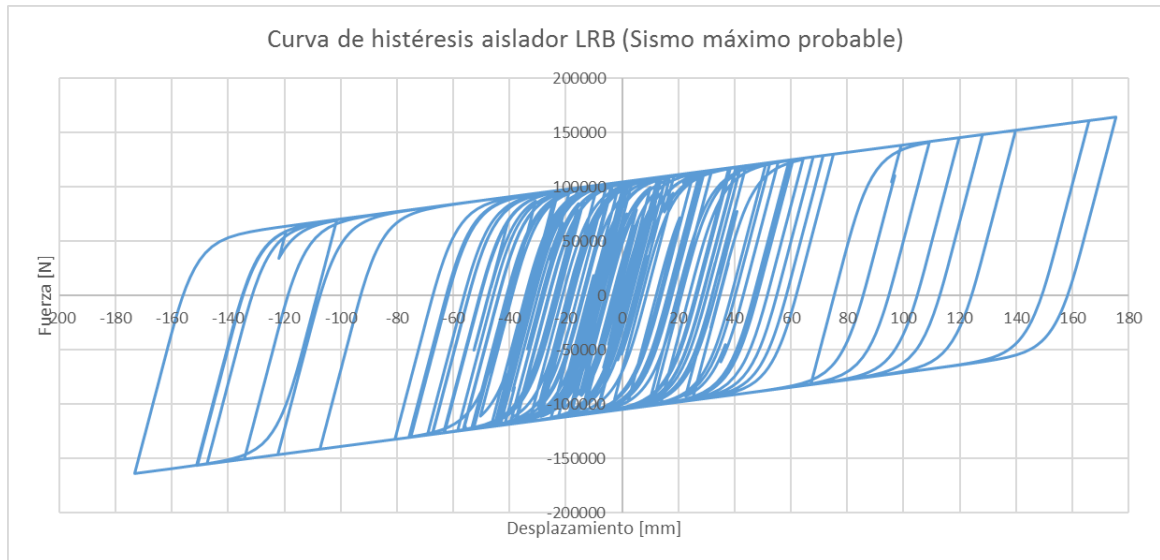


Figura 6.18 Curva de histéresis del aislador LRB bajo efectos de sismo de diseño.

7. Conclusiones y recomendaciones

- Se aporta con una guía ampliamente detallada para el diseño de un sistema de aislación basal utilizando aisladores elastoméricos con núcleo de plomo e incluso para sistemas combinados en los cuales se utilizan aisladores naturales de caucho.
- Se ha incorporado el respectivo proceso de modelamiento en un programa computacional de elementos finitos “Etabs 2015” para el análisis del sistema de aislamiento.
- La diferencia entre el análisis de un grado de libertad con respecto a varios grados libertad se debe al aporte de rigidez y amortiguamiento de los elementos estructurales de la superestructura.
- Existe una reducción considerable de cortante basal que pasa a la superestructura y su distribución hacia pisos superiores demostrando la eficiencia del sistema de aislación.
- Se obtuvo una reducción de cortante basal en el último piso de 30.25%.
- Se obtiene una disminución notoria de derivas de piso en la estructura aislada frente a la estructura empotrada lo cual producirá menores daños en los elementos estructurales y percepción del movimiento sísmico.



- El nivel de desempeño para elementos estructurales es de protección de vida de acuerdo con el código FEMA-356 para los eventos sísmicos analizados (diseño y máximo) con un porcentaje menor al 2% en deriva de piso.
- El aislamiento basal mejora la seguridad de la estructura frente a eventos sísmicos.
-
- Para la incorporación de un sistema de aislación se debe tomar en cuenta que todo el edificio se desacople del suelo incluyendo gradas y accesos. Conexiones eléctricas, hidrosanitarias y de agua potable deberán estar conformadas de un sistema flexible.
- Para las verificaciones de vuelco se debe considerar la carga axial máxima de una columna en sus diferentes estados de carga.
- Se debe tomar en cuenta que al incorporar un sistema de aislación a un edificio este sea lo suficientemente pesado (mayor a 100 toneladas) para asegurar un correcto dimensionamiento de los componentes del aislador.



8. Bibliografía

- Charleson, A W, P D Wright, and R I Skinner. 1987. "Wellington Central Police Station, Base Isolation of an Essential Facility." In *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, , 377–88.
- Choun, Young Sun, Junhee Park, and In Kil Choi. 2014. "Effects of Mechanical Property Variability in Lead Rubber Bearings on the Response of Seismic Isolation System for Different Ground Motions." *Nuclear Engineering and Technology* 46(5): 605–18. <http://dx.doi.org/10.5516/NET.09.2014.718>.
- Christopoulos, Constantin, André Filiatrault, and Vitelmo Victorio Bertero. 2006. *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. Iuss Press.
- Connor, Jerome, and Simon Laflamme. 2014. *Structural Motion Engineering Structural Motion Engineering*.
- Constantinou, Michael C., I Kalpakidis, a Filiatrault, and R a Ecker Lay. 2011. "LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators." MCEER-11-0(65): 1–371.
- Constantinou, Michalakis C, Ioannis V Kalpakidis, André Filiatrault, and R A Ecker Lay. 2011. *LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*. MCEER.
- Council., International Code. 2011. *2012 International Building Code*. Country Club Hills, Ill.: ICC.
- Datta, T K. 2008. "STRUCTURAL CONTROL FOR SEISMIC DISASTER MITIGATION." *Earthquake Hazards and Mitigation*: 45.
- JANGID, R S, and T K DATTA. 1995. "SEISMIC BEHAVIOUR OF BASE-ISOLATED BUILDINGS: A STATE-OF-THE ART REVIEW." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings* 110(2): 186–203. <http://dx.doi.org/10.1680/istbu.1995.27599>.
- Kelly, James M. 1993. "Earthquake-Resistant Design with Rubber."



- . 1997. *Earthquake-Resistant Design with Rubber*.
- Kelly, Trevor E, R Ivan Skinner, William H Robinson, and National Information Centre of Earthquake Engineering (Indian Institute of Technology Kanpur). 2010. *Seismic Isolation for Designers and Structural Engineers*. Kanpur, India: NICEE.
- Morgan, T, Andrew S Whittaker, and A Thompson. 2001. "Cyclic Behavior of High-Damping Rubber Bearings." In *Proceedings*,.
- Naeim, Farzad, and James M Kelly. 1999. *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons.
- Patil, SJ, and GR Reddy. 2012. "State Of Art Review - Base Isolation Systems for Structures." *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2(7): 438–53. <http://www.ijetae.com/Volume2Issue7.html>.
- Robinson, W H, and A G Tucker. 1976. "A Lead-Rubber Shear Damper." *Bull. New Zealand Natl. Soc. Earthquake Engrg* 4: 251–59.
- Robinson, WH, and AG Tucker. 1981. "Test Results for Lead-Rubber Bearings for Wm. Clayton Building, Toe Toe Bridge and Waiotukupuna Bridge." *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 14(1): 21–33.
- Shimoda, Ikuo et al. 2004. "Survey of Aging for LRB of a Base-Isolated Building Completed 15 Years Ago." In *ASME/JSME 2004 Pressure Vessels and Piping Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 1–6.
- Skinner, R. I., R. G. Tyler, a. J. Heine, and W. H. Robinson. 1980. "Hysteretic Dampers for The Protection of Structures from Earthquakes." *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering* 13(1): 22–36. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0018989287&partnerID=40&md5=31e833543789670fb1df56aab4774b1b>.
- Skinner, R I, and G H McVerry. 1975. "Base Isolation for Increased Earthquake Resistance of Buildings." *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering* 8(2).
- Touaillon, Jules. 1870. "Improvement in Buildings."



- Tyler, R G, and W H Robinson. 1984. "High-Strain Tests on Lead-Rubber Bearings for Earthquake Loadings." *EARTHQUAKE ENGINEERING* 17(2).
- Yegian, M K, and U Kadakal. 2004. "Foundation Isolation for Seismic Protection Using a Smooth Synthetic Liner." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(11): 1121–30.
- Zhou, Fu Lin, Zheng Yang, Wen Guang Liu, and Ping Tan. 2004. "New Seismic Isolation System for Irregular Structure with the Largest Isolaton Building Area in the World." In *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Citeseer.
- [203] O. Hasegawa, I. Shimoda, and M. Ikenaga, "Characteristic of Lead Rubber Bearing by Temperature," *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, B-2, Structures II, Structural Dynamics Nuclear Power Plants*, Architectural Institute of Japan, pp. 511-512, 1997 (in Japanese).
- [0010] Satish Kumar S.R.– Research On Earthquake Resistant Structural Design At IIT, Madras. (International Workshop on Earthquake Hazards & Mitigations on December 7-8, 2007 at IIT Guwahati, India, Paper No. 12)
- [008] Reddy G.R.– Seismic Design of Nuclear Facilities in India – Issues and R 7 D Efforts (International Workshop on Earthquake Hazards & Mitigations on December 7-8, 2007 at IIT Guwahati, India, Paper No. 15)
- [0018] Parulekar Y.M., Reddy G.R., Vaze K. K., Ghosh A.K.- Seismic response control of complex piping system using elasto-plastic dampers – Experiments and analysis. (International Workshop on Earthquake Hazards & Mitigations on December 7-8, 2007 at IIT Guwahati, India, Paper No. 55)
- [0019] Parulekar Y.M., Reddy G.R., Vaze K.K., Ghosh A.K., Khushavha H.S., Muthumani K. & Sreekala – Passive Seismic Control Of Piping System Using Shape Memory Alloy Damper. (13th Symposium on Earthquake Engineering held at IIT, Roorkee, from Dec 18-20, 2004, Paper No. 149)

